



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A  
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# STUDIUM POŽÁRNÍ ODOLNOSTI BETONŮ PRO TUNELOVÁ OSTĚNÍ

STUDY OF THE FIRE RESISTANCE OF CONCRETE FOR TUNNEL LINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VERONIKA ONDRYÁŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Veronika Ondryášová
<b>Název</b>	Studium požární odolnosti betonů pro tunelová ostění
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2014
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

Časopis Beton TKS

ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

Technické kvalitativní podmínky MD ČR pro stavby pozemních komunikací: Kapitola 18 TKP - beton pro konstrukce

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje

## **Zásady pro vypracování**

Cílem bakalářské práce bude shrnutí poznatků týkajících se požární odolnosti betonů pro tunelová ostění a možnostmi jejího zvyšování.

Základní body bakalářské práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních znalostí o požární odolnosti betonů pro tunelová ostění,
- vliv účinků požáru a vysokých teplot na vlastnosti jednotlivých vstupních surovin a betony v podzemním stavitelství,
- možnosti pro zvýšení požární odolnosti betonu pro tunelová ostění a samotná prevence před požárem,
- popis zajištění požární odolnosti na konkrétní, již realizované stavbě tunelu.

Část bakalářské práce bude zaměřena také na praktické aplikace týkající se požární odolnosti betonu pro tunelová ostění. Bude proveden návrh receptury betonu pro tunelová ostění se zvýšenou odolností proti působení vysokých teplot, kdy bude velký důraz kladen na požadavky a posouzení vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. Cílem bude také návrh a zjednodušené metodiky a zkoušení požární odolnosti betonu v laboratorních podmínkách. Bude sledován nejen vliv složení betonu, ale také samotné chování betonu při působení extrémních teplot.

Rozsah práce cca 45 stran.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá studiem požární odolnosti betonu pro tunelová ostění. Shrnuje problematiku dosavadních znalostí o odolnosti betonu v tunelech a zabývá se chováním jednotlivých částí betonu při vystavení vysokým teplotám. Dále je v práci popsáno zlepšení požární odolnosti pro výrobu betonu a také prevence před požárem.

**Klíčová slova: beton, požární odolnost, tunel, ostění, trvanlivost**

## Abstract

This bachelor thesis deals with the study of fire resistance of tunnel lining concrete. The thesis summarizes the complexity of the existing knowledge of concrete fire resistance in tunnels and deals with the behavior of individual parts of concrete when exposed to high temperatures. Next, the improvement in fire resistance for concrete production and fire prevention improvement is described.

**Keywords: concrete, fire resistance, tunnel, lining, durability**

## Bibliografická citace VŠKP

Veronika Ondryášová *Studium požární odolnosti betonů pro tunelová ostění*. Brno, 2015. 61 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29.5.2015

.....  
podpis autora

Veronika Ondryášová

## Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za pomoc, rady a připomínky. Stejně tak děkuji i dalším pracovníkům ústavu THD, rodině a spolužákům.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

# OBSAH

1. ÚVOD	9
2. CÍL PRÁCE	10
3. TEORETICKÁ ČÁST	11
3.1. Shrnutí znalostí požární odolnosti pro tunelová ostění	11
3.1.1. Protipožární odolnost konstrukce	15
3.1.2. Požární odolnost a legislativa	16
3.1.3. Mezní stavy požární odolnosti	17
3.2. Chování vstupních surovin při účincích požáru	18
3.2.1. Kamenivo	19
3.2.2. Cementový tmel	20
3.2.3. Výztuž	20
3.3. Vliv účinků požáru a vysokých teplot na vlastnosti jednotlivých částí ostění	21
3.3.1. Primární ostění tunelu	21
3.3.2. Sekundární ostění tunelu	21
3.4. Zlepšení požární odolnosti betonu	23
3.4.1. Kamenivo	23
3.4.2. Rozptýlená výztuž	23
3.4.2.1. Beton modifikovaný polypropylenovými vlákny	23
3.4.2.2. Beton modifikovaný skelnými vlákny	25
3.4.2.3. Beton modifikovaný ocelovými drátky	26
3.4.3. Plastifikační a superplastifikační přísady	27
3.4.4. Cement	28
3.4.5. Příměsi	28
3.4.5.1. Létavý popílek	28
3.4.5.2. Grafit	28
3.5. Protipožární ochrana	29
3.5.1. Aktivní ochrana	29
3.5.2. Pasivní ochrana	29
3.5.2.1. Stříkané malty	30
3.5.2.2. Prefabrikované panely	30



3.6. Zkoušky požární odolnosti	31
3.7. Příklad požární odolnosti na zhotovené stavbě – Královopolské tunely	34
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
4.1. Použité materiály	38
4.1.1. Cement	38
4.1.2. Kamenivo	38
4.1.2.1. Sítové rozbory kameniva	38
4.1.2.2. Objemová a sypná hmotnost	38
4.2. Složení betonu	42
4.3. Metodika práce	43
4.4. Výsledky zkoušek	44
4.4.1. Zkoušky čerstvého betonu	44
4.4.1.1. Zkouška sednutí, rozlití, objemová hmotnost	44
4.4.2. Zkoušky ztvrdlého betonu	44
4.4.2.1. Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu	44
4.4.2.2. Teplotní zatížení v peci	46
4.4.2.3. RTG difrakční analýza	49
4.4.4. Teplotní zatížení přímým plamenem	52
4.5. Navržená metodika zkoušek	53
5. DISKUZE VÝSLEDKŮ	55
6. ZÁVĚR	56
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	59
9. SEZNAM TABULEK	60
10. SEZNAM GRAFŮ	61

## 1. ÚVOD

Beton je na rozdíl od jiných konstrukčních materiálů nehořlavý. Je odolný vůči plamenům z hořících předmětů. Velkou výhodou je, že při požáru neprodukuje kouř ani plyny či toxické zplodiny. Beton nezvyšuje požární zatížení a nepřispívá k propuknutí nebo šíření požáru.

Téma požární odolnosti betonů pro tunelová ostění je v současné době jedno z nejdiskutovanějších témat při budování podzemních staveb. K této situaci přispěly velké ztráty na lidských životech při požárech v tunelech po celém světě. V řadě výzkumných center se zkoumají možnosti a zlepšování kvality pro betony v podzemním stavitelství. Dosavadní vývoje se stále zlepšují a umožňují lépe chránit beton pro tunelová ostění před působením požáru.

Jedno z nejdůležitějších kritérií při navrhování a realizaci podzemních staveb je schopnost konstrukce odolávat působení požáru a vysokých teplot. Pokud v tunelu začne hořet, v první řadě klademe důraz na záchranu osob uvězněných v tunelu a na schopnost příjezdu a bezpečného zásahu hasičských záchranných jednotek. Velice důležitým hlediskem je zdroj požáru, z kterého se oheň šíří. Na požár reaguje nejprve signalizační zařízení v tunelu, při kterém samotný systém vygeneruje danou situaci a spustí hasící a ventilační systémy. Tento stav je zabezpečen do příjezdu hasičů a poté velitel zásahu rozhoduje, jak se bude postupovat dále. Význam odolnosti betonu, z kterého je tunelové ostění vyrobeno, může mít na celkový průběh a hašení požáru zásadní vliv.

Vhodná receptura betonu může výrazně zvýšit odolnost vůči působení vysokých teplot. Zabrání také explozivnímu odprýskávání betonu a tím pádem omezí možnost zranění osob v tunelu. Může také ovlivnit celkovou kompaktnost betonu a eliminuje možnosti zborcení.

## 2. CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bude shrnutí znalostí o požární odolnosti betonů pro tunelová ostění. V práci budou popsány vlivy působící na vlastnosti vstupních složek betonu a na jednotlivé části tunelového ostění při působení vysokých teplot. Shrnutí budou také možnosti, které mohou zvyšovat požární odolnost betonu. Bude popsána ochrana a prevence tunelu před požárem. V neposlední řadě bude zhodnocena požární odolnost tunelového ostění na již realizované stavbě.

V experimentální části práce bude vytvořeno několik receptur betonu pro tunelová ostění s odolností proti působení vysokých teplot. Požadavky budou kladeny především na posouzení vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. Dále bude proveden návrh zjednodušené metodiky a zkoušení požární odolnosti v podmínkách laboratorního prostředí. V experimentu pozorujeme jak vliv složení betonu, tak chování betonu při působení vysokých teplot.

### 3. TEORETICKÁ ČÁST

#### 3.1. Shrnutí znalostí požární odolnosti pro tunelová ostění

Tunely jsou všeobecně pokládány za bezpečnou formu silniční dopravy. V případě požáru může v tunelech dojít nejen ke ztrátám na lidských životech, ale na zničení konstrukčních prvků v tunelu a jejich dlouhotrvajícím rekonstrukcím nebo dokonce trvalým uzavřením tunelu. Požární bezpečnost dopravní infrastruktury je tedy velice důležitá prvořadá. V současné době se po celém světě tvoří řada studií a výzkumů, díky kterým se posuzuje problematika požární bezpečnosti na vyšší úroveň. Nutnost těchto výzkumů podnítily především tragické nehody, díky kterým zemřelo v tunelech mnoho lidí.

Požadovaný stupeň bezpečnosti určuje takzvaná Bezpečnostní dokumentace. Tato norma je shrnutím postupů od samotného návrhu tunelu, přes její zkoušení až po trvalé používání a je součástí každé projektové dokumentace tunelových staveb. Popisuje také změny podmínek vnějších, kde řadíme například skladbu dopravy, nebezpečné náklady nebo meteorologické podmínky, ale také změny vnitřní, tedy stavební, technické a organizační. Norma by zároveň měla navrhopvat případná opatření ať už na stavební nebo technologické úrovni.

Z požárů v tunelech Mt. Blanc, Tauern a St. Gotthard vyšlo najevo hned několik praktických poznatků mezi které patří analýza geometrie tunelu, dopravy, systému větrání, způsobu provozování tunelu nebo podmínek vzniku požáru. Všechny tyto tunely potvrdily, že úspěšnost pro záchranu osob i minimalizací následku požárů závisí na prvních 10 - 15 minutách po vypuknutí požáru. Všeobecně však platí další rozhodující faktory, například chování osob v tunelu, reakce operátorů řídících provoz tunelu, funkčnost a výkon větracích systémů a zásah hasičských jednotek.

Lidský faktor je v krizových situacích nejčastějším důvodem selhání. Ať už hovoříme o lidech, kteří z hořícího tunelu utíkají nebo i o operátorech, kteří díky špatnému rozhodnutí mohou dobu na evakuaci zachraňovaných osob zkrátit. V současné době je snaha co nejvíce automatizovat proces a eliminovat chyby způsobené člověkem.

Údržba a technický stav tunelu je v mnohých případech požáru rozhodující. Fatální následky mohou totiž nastat již při nedovření dveří ve vzduchovodech nebo při blokování evakuačních dveří nežádoucími předměty.

Z technologického vybavení záleží na spolehlivosti systému, který včasně detekuje požár. Velmi důležité je také požární větrání a také proudění vzduchu v tunelu. Míra požární odolnosti stavby musí být zajištěna tak, aby nedošlo k selhání technologických zařízení. Únikové cesty v tunelech se navrhují po vzdálenostech 200, maximálně 300 metrů. Při splnění požadavků na únikové cesty je počtem potencionálních osob na únikovou přípojku zabráněno tvoření skupinek lidí, které mohou způsobit paniku.

Požární větrání tunelů můžeme rozdělit do tří etap, během kterých plní vzduchotechnické zařízení různé funkce. V první etapě je v automatickém režimu a zůstává v tomto režimu do příjezdu hasičů. V druhé etapě řídí záchranné práce velitel zásahu. Dle jeho pokynů se dále nechá automatický režim spuštěný nebo se vypne. Poslední etapou je samotná likvidace ohně.

Odvod a šíření kouře je určující a primární okolností po vypuknutí požáru. Během prvních několika minut totiž spaliny a kouřové plyny mohou zabít evakuované osoby. Schopnost fungování zařízení a odolnost stavby je stanovena jako rozmezí mezi 60 – 120 minutami. Důležitým faktorem odvodu kouře je především druh proudění, které jsou při požáru vyvolány ventilačními systémy.

Znemožnění pronikání kouře z jednoho požárního úseku do druhého je dosaženo pomocí přetlaku – proudění v tunelu určeném pro únik je reverzováno opačným směrem jízdy a ve směru stejným se zasaženým tunelem. Tímto systémem jsou chráněny také propojky. Větrací systémy musí být schopny reagovat na situaci dopravy v tunelu, ale také například na rychlost větru a další.

Kouř se všeobecně odvádí dvěma způsoby. Podélný systém je založen na vytlačení kouře ve směru jízdy výjezdovým portálem ven. Další systémem je příčný odvod kouře, který se využívá u dlouhých tunelů nebo u městských tunelů. Odvod kouře je zajištěn větracími otvory ve stropě tunelu.

U odvodu kouře je důležitá rychlost proudění vzduchu. Při vyšší rychlosti se zplodiny pohybují ve směru proudění, naopak při nižších rychlostech se šíří do obou směrů. Velikost se dá určit stratifikovaným šířením kouře do obou směrů v oblasti stropu tunelu. Těsně nad vozovkou je vrstva čerstvého vzduchu

podporující hoření. Obecně platí, že čím je vzdálenost kouře od epicentra požáru větší, tím je kouř chladnější a ředěnější čerstvým vzduchem. V případě, že kouř odsáván není, klesne na stejnou hladinu proudu rychlosti čerstvého vzduchu přisávaného požárem a celý tunel zaplní kouřem. Vzniklé množství kouře je v poměru s průběhem tepleného výdeje hoření. Nebezpečí nastává při rychlém větrání, kdy odvod spalin rychle ustupuje, ale čerstvý vzduch podporuje hoření ohně.

U rozhodnutí dispečerů, který ventilační systém bude použit, rozhoduje mnoho proměnných. Mezi nejdůležitější je dopravní stav v tunelu. Výchozí proudění v těchto případech bývá ve směru jízdy, automobily za požárem vyjíždějí a dojíždějí automobily před požárem.

V případě požáru v tunelu hodnotíme stavbu jako táhlou troubu, ze které nelze jednoduše odvádět teplo ani kouř. Tepelné zatížení je zde velice vysoké a tato zátěž se nedá určit zcela jednoznačně. Záleží totiž na druhu vozidla, které je zdrojem požáru. [1]

<b>Vozidlo</b>	<b>Vyvinutá energie [MW]</b>	<b>Délka požáru [min]</b>
osobní automobil	5 - 10	30 - 60
nákladní automobil	100	120
kamión s cisternou	300	120 - 240
metro, autobus	40	90 - 120
vlak	300	120 - 240

*Tabulka 1 – vyvinutá energie při dané délce požáru*

Vzhledem k různým možnostem zdroje požáru byly vytvořeny různé teplotní křivky pro tunelové stavby, ve kterých zohledňujeme maximální teplotu, časový průběh požáru a druh vozidla. U všech křivek je zohledněna rychleji stoupající teplota.

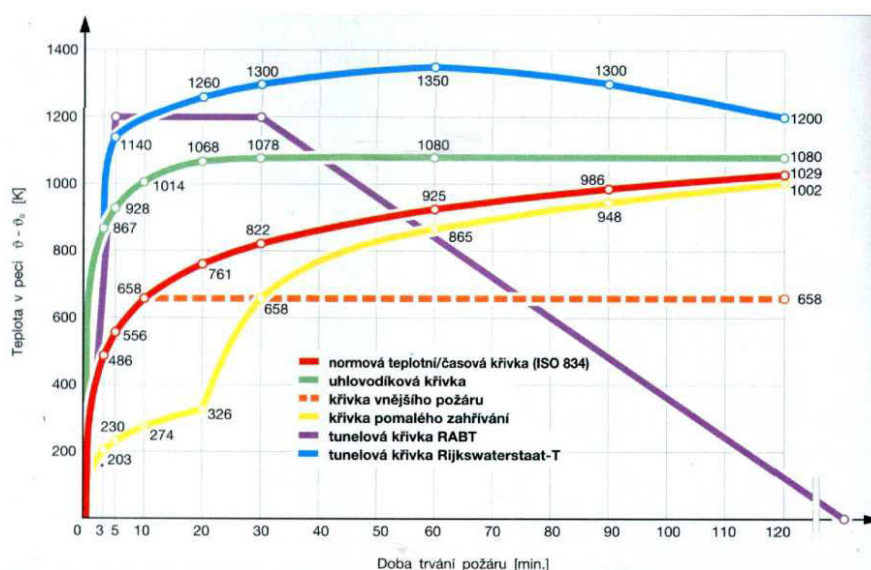
Normová teplotní křivka ISO 834 popisuje normové namáhání, které stanovuje dobu požární odolnosti části stavby.

Uhlovodíková křivka se všeobecně používá v případech, kdy při hoření a dostatečném zdroji vzduchu může teplota požáru rychle stoupat.

Nejrychlejší možný nárůst teplot charakterizují křivky RABT a křivka Rijkswaterstaat-T, které jsou používány v tunelech. Teploty 1200°C je dosaženo během pěti minut, v průběhu dvouhodinového požáru stoupá na 1350°C a na konci opět klesá na teplotu 1200°C.

Pro požární zatížení, které působí zevnějšku stavby hodnotíme křivkou vnějšího požáru. Křivka zohledňuje nižší nárůst a průběh teplot na rozdíl od teploty požáru uvnitř budovy.

Teplotní zatížení křivky pomalého zahřívání používáme především u protipožárních vrstev, aktivovaných pouze tepelným vedením ohně. Výrobky jsou klasifikovány na základě nižšího teplotního zatížení, které bývá pro pomalém vzestupu teploty nižší. [2]



Graf 1 – teplotní křivky

### 3.1.1. Protipožární odolnost konstrukce

Požární odolnost je definována jako schopnost konstrukce, části konstrukce nebo prvku plnit funkci (přenášet zatížení a/nebo oddělovat) při definovaném vystavení požáru po určitou dobu. Požární odolnost je vztažena na konstrukční prvky nikoliv na materiál, ale vlastnosti materiálu ovlivňující chování prvku a konstrukce.

Tuto vlastnost můžeme popsat jako čas mezi počátkem požáru a okamžikem, kdy už konstrukce dále nemůže plnit svou původní funkci, ať už pro zhroucení nebo deformaci nad únosnou míru.

Za hlavní účel protipožární ochrany je považována evakuace osob z tunelu, které jsou schopny opustit prostor samy nebo s pomocí. Mezi další účely patří zabezpečení prostoru při záchranných operacích a opatření proti zřícení tunelu. Mezi dodatečné účely řadíme omezení narušení dopravy během oprav po požáru.

Typ tunelu může ovlivnit protipožární požadavky. U ražených tunelů může dojít k zasypaní celého tunelu, ale u hloubených tunelů bude zhroucení jen omezené. Požadavkem je především omezení postupného zhroucení konstrukce a zajištění podélných systémů.

Intenzivní vysoká teplota může vést ke ztrátě pevností betonu. Protipožární odolnost je tedy nutné hodnotit jako celek konstrukce, která závisí na typu a zpevnění a dodatečné ochraně.

Odštěpování betonu způsobují rozdíly teplot a rozpínání. Odprýskávání neohrožuje evakuované osoby z tunelu, ale především zasahující záchranné jednotky. Štěpení betonu lze eliminovat, ne však zcela odstranit. Velice důležitým prvkem je ventilační systém, na který je dbán velký důraz. Selhání tohoto systému by znemožnilo odsávání spalin. Únikové cesty jsou použity v prvních fázích požáru a je nutné zajistit jejich bezpečnost po dobu 30 minut. V některých tunelech jsou tyto cesty vedeny jako přístupové cesty hasičů a doba je delší. Bezpečnostní dveře, výklenky a vybavení nacházející se mezi tubusy musí po určitou dobu plnit nosnou funkci. Únikové dveře musí odolat po dobu 30 minut, dveře mezi tubusy musí odolat po dobu řádově hodin. [3]



### 3.1.2. Požární odolnost a legislativa

Požární odolnost můžeme charakterizovat jako schopnost konstrukce odolávat účinkům požáru při zachování nosnosti a izolačních schopností. Požadavky požárních odolností k požárnímu riziku úseků stanovují normy. Pokud při návrhů pracujeme s jinými podklady, musí mít požární úsek daný stupeň požární bezpečnosti, ke kterému je přiřazena odpovídající odolnost proti ohni. Daného stupně požární bezpečnosti požárního úseku dosáhneme tehdy, když všechny konstrukce vykazují takovou požární odolnost, jaká je požadovaná v tabulce.

Požadovaný stupeň požární bezpečnosti stavebních konstrukcí						
I	II	III	IV	V	VI	VII
Požadovaná doba požární odolnosti požárních stěn a stropů						
15+	30+	45+	60+	90+	120+	180+

*Tabulka 2 – stupeň a doba požární odolnosti*

Tunely na pozemních komunikacích rozdělujeme dle délkové klasifikace na tunely:

- Krátké (do 300 metrů délky) řadíme do V. stupně požární bezpečnosti s požadavky na požární odolnost konstrukcí 90 a více min dle normové teplotní křivky
- Střední a dlouhé tunely (nad 300 metrů délky) řadíme do VII. stupně požární bezpečnosti s požadavky na požární odolnost konstrukcí R 180 min dle normové teplotní křivky

Požadovaná požární odolnost všech konstrukcí musí být při běžném provozu zajištěna po celou předpokládanou životnost stavebního díla. Tato životnost je očekávána 100 let. [4]

### 3.1.3. Mezní stavy požární odolnosti

Pro dosažení mezních stavů požární odolnosti má velký vliv časový průběh požáru, především průběh nárůstu teploty při požáru, který je různý a závislý na mnoha faktorech především na:

- povaze hořlavého materiálu
- výhřevnosti hořlavého materiálu
- uložení
- větrání při požáru
- konstrukčním a architektonickým řešením objektu
- meteorologickým podmínkách

Při požáru nesmí být narušeny mezní stavy, kterými jsou:

<b>R</b>	únosnost
<b>E</b>	celistvost
<b>I</b>	izolační schopnost, mezní hustota tepelného toku na neohřívané straně
<b>W</b>	hustota tepelného toku
<b>S</b>	prostup zplodin hoření
<b>M</b>	mechanické působení (náraz na zahřátou požární stěnu)
<b>C</b>	opatření samouzavíracím zařízením

*Tabulka 3 – mezní stavy požární odolnosti*

**R** - únosnost je doba v minutách, po kterou zkušební prvek zachovává svou schopnost nést při zkoušce zkušební zatížení. Schopnost se stanoví velikostí a rychlostí deformace.

**E** - celistvost je doba uběhlého času v minutách, po kterou zkušební prvek zachovává při zkoušce svoji dělicí funkci

**I** - izolační schopnost je doba uběhlého času v minutách, po kterou zkušební vzorek zachovává při zkoušce svoji dělící funkci, aniž by na neohřívané straně byly dosaženy nežádoucí teploty

**W** - hustota tepelného toku je doba, po níž maximální hodnota radiace na neohřívaném povrchu nepřekročí  $15 \text{ kW.m}^{-2}$

**S** - prostup zplodin hoření je schopnost prvku snížit nebo vyloučit pronikání kouře z jedné strany prvku na druhou

**M** - mechanické působení je schopnost prvku odolávat rázu pro případ, kdy konstrukční porušení jiného dílu při požáru způsobí náraz na posouzený prvek

**C** - opatření samouzavíracím zařízením se uplatňuje u prvků, které se musí zavírat automaticky po každém otevření [5]

### **3.2. Chování vstupních surovin při účincích požáru**

Při působení vysokých teplot na beton, dochází ve struktuře k mnoha značným mechanickým a fyzikálním změnám.

Při teplotách nad  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se odpařuje voda fyzikálně vázaná a vlhkost v pórech. Rychlost odpaření ovlivňuje druh a technologické provedení betonu.

Do teploty  $250^{\circ}\text{C}$  dochází k prvním významným degradacím betonu.

Při teplotách  $250 - 420 \text{ }^{\circ}\text{C}$  může dojít k odštěpování, kdy odpadávají části betonu z povrchové části konstrukce.

Nad  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází k poklesu pevnosti, která se snižuje v rozmezí 15-40%. Povrch betonu je narušen mikrotrhlinami.

V rozmezí teplot  $400 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  odchází z betonu voda chemicky vázaná, dochází k přeměně hydroxidu vápenatého na oxid vápenatý.

Mezi teplotou  $550 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  začínají degradovat materiály z cementových složek a nad  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  beton ztrácí únosnost.

Teplota plynů dosahuje při požáru běžně 900°C, ale teplota plamenů může mít i více než 1200 °C, při těchto teplotách se beton začíná tavit. [6]

### 3.2.1. Kamenivo

Druh a vlastnosti kameniva mohou při požáru značně ovlivnit chování betonu. Tyto vlastnosti se mění s rychlostí růstu teplotní roztažnosti a trvalými změnami, které po požáru zůstanou.

Malé objemové změny nastávají u kameniva z čediče, škváry, pemzy nebo vápencových štěrků. Největší objemové změny po vychladnutí dochází u kameniv s obsahem křemene. Kamenivo se při požáru může změnit i tvarově. Vápencové kameniva se vypalují, křemence pukají a struska se taví. Pro různé druhy kameniva je charakteristická především teplota, při které mění své vlastnosti. Pórovité kamenivo z pemzy odolává i teplotám okolo 1000°C. Slída se v kontaktu s ohněm rozpadá a vytváří v materiálu trhlinky. Betony obsahující vápenité kamenivo vykazují snížení objemové hmotnosti při teplotě 800°C, způsobené rozkladem vápencových složek.

Narušení soudržnosti kameniva a cementového tmele při působení požáru a po vychladnutí způsobuje rozdílnost tepelných deformací a vyvolání napětí v dotykových plochách obou složek. Napětí však mohou vznikat i při dalších situacích jako je například hašení požáru vodou a náhlému ochlazení. Důležitá je také vlhkost betonu jako taková.

Druh kameniva ovlivňuje pevnosti v oblasti teplot 20 – 500°C. Druh použitého kameniva má vliv především na modul pružnosti. Betonu s křemičitým kamenivem modul pružnosti velmi klesá. U betonu s lehkým kamenivem je tomu naopak, modul pružnosti se nezmění téměř vůbec. Díky barevné změně betonu při působení teplot můžeme určit druh použitého kameniva. Narůžovělá barva je charakteristická pro betony s křemičitým kamenivem. Vápenec je rozpoznatelný svou žlutohnědou barvou. Obsah slídy v písku poznáme zlatou přeměnou. Barevné změny jsou znatelné až při teplotách okolo 400°C. Důležitou vlastností betonu je i schopnost vedení tepla. Hutné a vlhké betony s křemenem vedou teplo velice dobře, opačným případem vedení tepla jsou betony se suchým lehkým kamenivem. [7]

### 3.2.2. Cementový tmel

Změny, které vznikají v cementovém tmelu při působení vysokých teplot a při požáru ovlivňuje hned několik faktorů. Mezi ně patří mineralogické složení cementového pojiva, poměru  $\text{CaO/SiO}_2$  složek, kvalitě a jemnosti krystalů, především pak na intenzitě teploty a jejím tlaku.

Při zvýšeném působení vysokých teplot na cementový tmel nejdříve z materiálu uniká veškerá voda, která se odpařuje. Jako první je to voda volně vázaná. Jako další odchází voda fyzikální, která je obsažena ve struktuře a kapilárách. Vazby chemické se uvolňují až při vyšším a intenzivnějším zatěžování vysokými teplotami.

Důležitou vlastností cementového tmele je zabezpečit soudržnost celého materiálu. V případě, že se cementový tmel začne při zatížení vysokých teplot rychle měnit a ztrácet své vlastnosti, ohrozí tak soudržnost a kompaktnost celého materiálu.

Porušení betonu nastává při hašení konstrukce vodou, kdy se se materiál rozpíná, vznikají trhliny a začíná se drolit. Při modifikaci cementového tmele zabráníme jeho drolení a zlepšíme kompaktnost. Dehydratačním procesům při požáru lépe odolávají směsné cementy, popílky nebo struska. [8]

### 3.2.3. Výztuž

Na vlastnosti betonu s výztuží při působení ohně má vliv soudržnost materiálu s výztuží. Problém nastává při teplotách nad  $100^\circ\text{C}$ , kdy se součinitel teplotní roztažnosti oceli začíná zvyšovat. Výztuž se při vysokých teplotách rozpíná, působí tak nepříznivě na beton a vyvolává v něm napětí a klesá soudržnost materiálů. Ke splnění požárních odolností požadujeme, aby byly rozdíly mezi součiniteli tepelné vodivosti materiálů co nejmenší. Za normálních teplot je tato metoda založena na stejné teplotní roztažnosti oceli a betonu.

Rozhodující může být například také struktura a povrch výztuže. Hladký povrch ocelových výztuží negativně ovlivňuje soudržnost betonu při požáru. Pokud je výztuž napadena korozí chová se v betonu podobně jako žebírková ocel. Úprava vodního součinitele nemá na soudržnost betonu výraznější vliv.

Podstatnější vliv má na soudržnost betonu správný druh kameniva. Pokud nejsou v betonu vyvolány velké tepelné deformace, soudržnost betonu je podstatně vyšší. [9]

### **3.3. Vliv účinků požáru a vysokých teplot na vlastnosti jednotlivých částí ostění**

#### **3.3.1. Primární ostění tunelu**

Nejdůležitější funkcí primárního ostění je zajištění stability výrubu, omezení přetvoření horninového prostředí a zajištění tvaru výrubu. Dále musí přenášet zátěž, která na něj působí, chránit prostor výrubu do kterého mohou padat úlomky a minimalizovat množství vody, která do výrubu přitéká.

Montáž prvků primárního ostění by měla být jednoduchá, zůstává prvkem definitivního ostění a musí spolehlivě podporovat líc výrubu. Nejčastěji jsou používány ocelové výztužné prvky nebo různé druhy kotvicích prvků. Profily obloukové výztuže nahrazují ocelové výztužné prvky, které jsou spojovány spoji šroubovými nebo třmenovými žádaných tvarů a profilů. Vytvořená výztuž je velmi poddajná. Při pažení je nejčastěji využito ocelových plechů nebo kombinace ocelových svařovaných sítí a stříkaného betonu.

Primární ostění je při požáru vzdáleno od ohně nejdál. Před působením ho chrání sekundární a definitivní ostění. Vzhledem k tomu na beton pro primární ostění není kladena tak vysoká požární důležitost, jako u jiných složek ostění. [10]

#### **3.3.2. Sekundární ostění tunelu**

Sekundární ostění musí zajišťovat především ochranu vnitřního prostředí tunelu během celé životnosti. Nejčastějším způsobem je provádění z monolitického betonu, buďto prostého nebo železobetonu. Častým řešením bývá vložení hydroizolace z fólií PVC mezi primární a sekundární vrstvu ostění. U tunelů s menší náročností výstavby je sekundární ostění vytvořeno z dalších vrstev stříkaného betonu. Sekundární ostění musí splňovat jak estetické tak protipožární požadavky.

Nejběžnější tloušťka sekundárního ostění se pohybuje v rozmezí 300 – 400 mm. Pokud je tunel založen v dobrých geologických podmínkách můžeme navrhnout profil s otevřeným ostěním. Při založení tunelu v nestálých geologických podmínkách musíme zhotovit protiklenbu.

Dilatační a pracovní spáry musí být dostatečně zabezpečeny při betonáži sekundárního ostění. Po zatvrdnutí betonu a odbednění beton chráníme PVC fóliemi nebo speciálními nástřiky, které zamezují smršťování trhlin. Sekundární ostění je v přímém kontaktu s prostorem tunelu a mělo by proto splňovat řadu důležitých funkcí. Mezi ně patří například únosnost a mezní stavy porušení normálovou silou a ohybovým momentem, posouvající silou a místně zatížené plochy. Dalším kritériem je použitelnost a zde řadíme omezení napětí, trhlin a průhybů. U trvanlivosti klademe důraz především na pevnostní třídu betonu a krytí výztuže.

Beton pro silniční tunely je ve většině případů dvojího druhu a to bez plášťové izolace (min C 30/37 odolávající prostředí XF4, XD3, XA2) nebo s plášťovou izolací (min C 25/30 odolávající prostředí XF3, XD3). Minimální krycí vrstva výztuže je stanovena dle normy a agresivity prostředí, minimálně však 50 mm. U betonáže je povolená délka pásů maximálně 12,5 m. U portálových pásů, připořálových pásů a pásů z prostého betonu maximálně 10 m. Délka pasu pro ostění z vodonepropustného betonu je maximálně 10m. Odbedňování probíhá po 12 hodinách. Ošetřování betonu pro definitivní ostění má dvě fáze, 1 týden beton zvlhčujeme a na závěr nanese uzavírací ochranný nástřík. Injektáž vrchlíku můžeme provádět po 56 dnech cementovou maltou při působení tlaku 0,2 MPa.

Během požáru je definitivní ostění tunelu v přímém kontaktu s ohněm. Nejdůležitější vlastnosti betonu odolného proti požáru by měl mít právě beton pro definitivní ostění. Recepturu betonu můžeme upravit přidáním složek, které odolávají ohni a vysokým teplotám. [11]

### **3.4. Zlepšení požární odolnosti betonu**

#### **3.4.1. Kamenivo**

Při návrhu betonu odolnému proti vysokým teplotám je kamenivo důležitým vstupním parametrem. V betonu zaujímá největší podíl všech složek a tak může mít rozhodující funkci. Důležitou vlastností je fyzikální a chemická stabilita kameniva. O tepelném přetvoření kameniva může rozhodnout mineralogické složení. Během zatížení teplotou může kamenivo měnit svůj tvar a objem. Všeobecně se do betonů odolávajícím vysokým teplotám přidávají kameniva s nízkou tepelnou roztažností a minimálním přetvořením. Vhodnými druhy kameniva jsou například čediče nebo žuly. [12]

#### **3.4.2. Rozptýlená výztuž**

Pro zlepšení některých vlastností betonu používáme do čerstvého betonu při jeho výrobě přídavek rozptýlené výztuže. Druhy vláken jsou odlišné jak materiálem, tak délkou či tvarem. Rozptýlená výztuž musí být při tvorbě betonu dokonale a rovnoměrně rozptýlena po celém objemu. Vláknobetony lépe odolávají tahovým napětím, omezují objemové změny materiálu a zlepšují houževnatost materiálu. Některé druhy vláken jsou schopny zlepšovat vlastnosti betonu při účinkům vysokých teplot. [13]

##### **3.4.2.1 Beton modifikovaný polypropylenovými vlákny**

Vlákna, která mají průměr v řádech mikronů a výrazně zlepšují protipožární ochranu betonu. Mezi největší přednosti těchto druhů betonů patří menší a v některých případech dokonce nulové povrchové odstřelování betonu při působení vysokých teplot. Metoda je založena na tavení vláken při teplotě kolem 160°C, vodní pára přítomná v betonu uniká bez vytváření vnitřního tlaku a nezpůsobuje tak nežádoucí odstřelování materiálu. Návrhové stanovení počtu vláken je přímo úměrné velikosti potencionálního požáru – čím větší požár, tím



větší množství vláken navrhujeme do receptury. Nevýhodou při aplikaci je horší čerpatelnost betonové směsi.

Účinnost protipožární ochrany u betonů s výztuží rozptýlených vláken je různá a ne vždy se dá předpokládat její chování. Může jí ovlivnit několik faktorů a to například

- typ vlákne, jejich průměr a délka
- množství použitých vláken na kubický metr
- typ kameniva
- návrh betonové směsi
- propustnost betonu s nízkým vodním součinitelem
- teplotní nárůst a maximální teploty
- vysoký stupeň ztráty betonové masy v místě ocelové výztuže
- vlhkost obsažena v betonu
- zatížení betonové konstrukce

Hlavní funkcí vláken při požáru je vytváření dutinek při působení vysokých teplot. Na začátku požáru vlákna vyhoří; a vytvoří dutinky, ve kterých se může při požáru expandovat vodní pára. V betonu se snižuje vnitřní napětí a celkově se zvyšuje požární odolnost. [13]



*Obrázek 1 – polypropylenová vlákna*

### 3.4.2.2 Beton modifikovaný skelnými vlákny

Skelná vlákna musí odolávat silně alkalickému prostředí v betonu. Vlákna jsou upravena speciálním složením skloviny, ze které jsou vyrobeny. Dále můžeme vlákna upravit lubrikací, tedy vytvoření jemného povlaku na povrchu vláken. Kromě alkalivzdornosti má lubrikace význam také u rovnoměrného rozmíšení vláken ve směsi betonu. Délka skelných vláken používaných do betonů je 12 mm a průměru 14  $\mu\text{m}$ .

Skelná vlákna v betonu mohou plnit několik funkcí. Mezi ty nejdůležitější patří ochrana betonu proti trhlinám nebo zvýšení pevnosti v tahu za ohybu, rázům a houževnatosti. Na rozdíl od polypropylenových vláken vykazují skelná vlákna vyšší pevnost v tlaku až 3000 MPa, mají také větší modul pružnosti 70 MPa.

Při požáru se vlákna taví a vytváří prostor pro odchod vodní páry ze struktury betonu. Celkově přispívají skelná vlákna k soudržnosti konstrukce při působení vysokých teplot. [14]



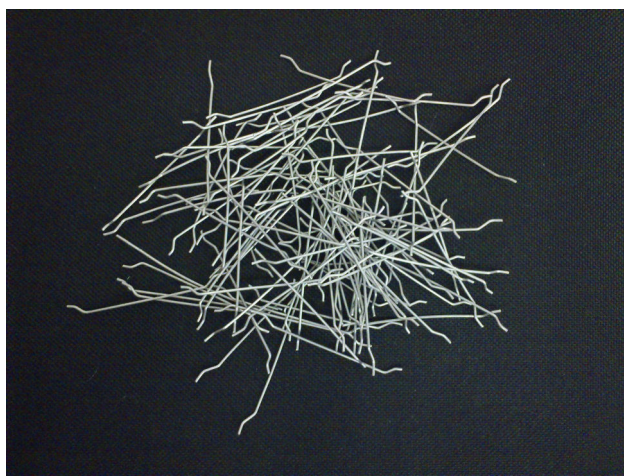
*Obrázek 2 – skelná vlákna*

### 3.4.2.3 Beton modifikovaný ocelovými drátky

Ocelová vlákna můžeme rozdělit do několika kategorií podle tvaru, průřezu nebo materiálu, ze kterého se vyrábí. Nejčastější velikost průřezu ocelových vláken je 0,15 – 1,2 mm, délka se pohybuje v rozmezí od 12 do 70 mm. Vlákna mohou mít kruhový nebo obdelníkový průřez v různých tvarech. Nejpoužívanější jsou rovná vlákna s hladkým nebo profilovaným povrchem, zvlněná vlákna nebo vlákna segmentová.

Ocelová vlákna přinášejí betonu nejen vyšší užitné hodnoty, ale také odlišné mechanické vlastnosti v porovnání s betonem nevyztuženým. Vláknobetony jsou schopny přenášet vyšší ohybové momenty a statická účinnost je patrná v celém profilu betonu. Dávkování se pohybuje od 25-50 kg/m<sup>3</sup>. Vlákna můžeme dávkovat do suché směsi nebo do domíchávače. Důraz je kladen především na homogenizaci směsi. Pokud se beton špatně promíchá, mohou vznikat shluky ocelových vláken, způsobují nerovnoměrné rozptýlení a nedokonale vyztužují konstrukci. Při dávkování se používají rozdělovače, které vlákna rovnoměrně dávkuje do celého objemu čerstvého betonu.

Ocelové vlákna v betonové matrici jsou schopny odolávat teplotám až 1600°C. Beton modifikovaný ocelovými vlákny vyniká především při působení vysokých teplot delší časovou výdrží konstrukce než beton prostý. Drátkobetony brání nadměrnému odštěpování povrchu konstrukce při požáru a zaručují dostatečnou soudržnost materiálu. [15]



*Obrázek 3 – ocelová vlákna*

### 3.4.3. Plastifikační a superplastifikační přísady

Plastifikační přísady jsou chemické látky, které se přidávají do betonu z důvodu snížení množství záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti. Redukujeme tedy vodu, kterou do betonu přidáváme z důvodu získání vhodné konzistence pro danou betonovou směs. Množství použité plastifikační přísady vyjadřujeme v % hmotnosti přísady z hmotnosti cementu. Plastifikační přísady nijak nenarušují tvorbu hydratačních produktů.

Obecně můžeme plastifikační a superplastifikační přísady rozdělit dle chemického složení na bázi

- solí a derivátů ligninosulfonanů
- polykarboxylátů
- polykarboxeterů
- sulfonovaných naftalenformaldehydových
- melaminformaldehydových kondenzátů
- kopolymerů karboxylových kyselin s akrylestery

Pozitivním faktorem při přidání plastifikačních přísad do požárně odolných betonů je redukce vody. Při působení vysokých teplot se volná voda v betonu odpařuje velice rychle a betonová konstrukce ztrácí schopnost kompaktnosti. S obsahem plastifikačních přísad snížíme spotřebu záměsové vody na přípravu betonové směsi. V případě vystavení konstrukce požáru s nižším obsahem vody se volná voda neodpařuje tak rychle a konstrukce odolává teplotám delší dobu.

[16]

#### **3.4.4. Cement**

Hydraulická maltovina, která vzniká pálením vápence a jílu při teplotách 1450 C. Při výrobě se dále přidávají korekční příměsi a směs se mele na jemný prášek. Kvůli požadavkům na tuhnutí a rychlého náběhu počátečních pevností se nejčastěji používá cement třídy CEM I 42,5 R.

Pevnostní ztráty jsou patrné u betonu s vyššími dávkami cementu. Ztrátou vody betonů obsahujících portlandský cement dochází ke smrštění, které se zvyšuje s narůstající teplotou. Při teplotách nad 500°C dehydratuje hydroxid vápenatý na oxid vápenatý. Ve struktuře betonu vzniká trvalé smrštění a trhliny na povrchu. Při hašení požáru může dojít k nové hydrataci, při které roste objem betonu. Nejvhodnější cementy pro beton zatížený vysokými teplotami je cement s obsahem strusky, železoportlandský nebo vysokopecní. [13]

#### **3.4.5. Příměsi**

##### **3.4.5.1. Létavý popílek**

Popílek je vedlejším produktem při spalování uhlí. Je zachycován na filtrech a přidáván do betonu za účelem zlepšení jeho vlastností. U popílků je třeba dbát na rozdílné chemické, ale i mineralogické složení. Do betonu se nejčastěji používá popílek z černého uhlí. Díky popílku redukuje množství spotřeby cementu. V případě protipožárních betonů se používají ve formě příměsí jako odolný prvek vlivu požáru. [13]

##### **3.4.5.2. Grafit**

Grafit můžeme do betonu přidávat ve formě přísady. Existuje několik frakcí mletého grafitu. Vločkový frakce až 0,16 mm, jemně mletý 0,025 mm a pudrový grafit 0,007 mm. Uhlík vyniká především svou vysokou teplotou tání, která se pohybuje okolo 4000°C. Výhodou grafitové moučky je především snadná homogenizace a rovnoměrné rozptýlení betonu. Přidáním mletého grafitu do

betonu můžeme docílit kompaktnosti cementové matrice při působení a lepšímu odolávání vysokých teplot. [17]

### **3.5. Protipožární ochrana**

#### **3.5.1. Aktivní ochrana**

Systémy aktivní ochrany jsou v případě vzniku požáru v tunelu aktivovány výstražnými čidly. Mezi tyto ochranné prvky řadíme vodní rozstřikovače, vodní mlžení nebo například pěnotvorné systémy. Všechny tyto způsoby zamezují rozšíření požáru. Největší nebezpečí u tohoto způsobu ochrany vzniká při náhlém selhání mechanických nebo elektrických jednotek, které tyto systémy řídí. Velkým nebezpečím je také smíchání pěnového média s toxickými výpary.

Zařízení pro detekci ohně jsou buď místní (detekce ohně v podzemních základnách a v technických místnostech), nebo lineární (tepločinný kabel) v dopravním prostoru.

Pro hašení požárů používáme

- automatická zařízení v technických místnostech a podzemních základnách,
- práškové hasicí přístroje pro použití uživateli tunelu,
- zařízení pro hasiče: vodní potrubí a hydranty - v některých zemích i pěnové potrubí. Objem vodních nádrží je různý. Závisí na místních předpisech a konkrétních podmínkách v tunelu.

Mezi aktivní prvky požární ochrany řadíme vodní rozstřikovače, vodní mlžení a pěnotvorné systémy.

#### **3.5.2. Pasivní ochrana**

Systémy pasivní ochrany chrání ostění tunelů před působením požáru po celou dobu. Pasivní ochrana není aktivována iniciačním systémem nebo sama požár nehasí, ale je vždy funkční. Tvoří ochrannou bariéru mezi požárem a vnitřní strukturou tunelového ostění. Zabraňuje také vnikání ohně do ventilačních

systémů. Udrží stabilitu konstrukce ostění, chrání tunel před zhroucením a umožňují tak bezpečnou evakuaci osob a bezproblémový příjezd a zásah hasičských záchranných složek.

V tunelech hloubených je cílem protipožární ochrany bránit přístupu plamene na výztuž, která je součástí stropu tunelu. V ražených tunelech je prvotním úkolem zabránit explozivnímu odprýskávání, které je charakteristické pro betony vyšších tříd. Experimenty provedené v posledních letech ukázaly, že polypropylenová vlákna snižují tlak ve vnitřních pórech betonu a zmenšují riziko odprýskávání. Vysoké požadavky pasivní ochrany tunelů jsou například vysoká rychlost nárůstu teploty, která se pohybuje 1000°C za 5 minut a vrchol při teplotách 1350°C.

#### **3.5.2.1. Stříkané malty**

Mezi stříkané malty řadíme především výrobky na bázi vermikulitových ručně nanášených cementů, které však mají velmi nízkou pevnost v tlaku a nesplňují požadavky na odolnost vůči zatížení v cyklech. Mechanickou návaznost ke konstrukci tunelu zajišťujeme pomocí roštů z nerezové oceli.

Po celou dobu životnosti tunelu jsem pro stříkané systémy velmi důležité fyzikální a chemické zatížení na konstrukci. Tloušťka vrstvy je především dána trváním a velikostí předpokládaného požáru. Největší nevýhodou stříkaných betonů je jejich povrch. V silničních tunelech je totiž velice důležitým parametrem vysoký odraz světla z důvodů velmi frekventované dopravy. Povrchová úprava je možná zahrazením omítky nebo nátěrem, obě metody jsou však velice pracné. Železniční tunely nejsou tak přísné na požadavky definitivního ostění tunelů.

#### **3.5.2.2. Prefabrikované panely**

Tento druh protipožárních panelů je používán především do tunelů, které nemají zvláštní zakřivený profil nebo složitou geometrii průřezu a mohou být pokryty panelovými prvky. Mezi výhody prefabrikovaných panelů patří snadná povrchová úprava, naopak velkou nevýhodou mohou být dražší pořizovací náklady oproti například stříkaným formám definitivního ostění tunelu. Další značnou nevýhodou jsou časté opravy desek způsobené například nárazem

vozidla. Dalšími způsoby zlepšení pasivní požární odolnosti jsou protipožární nátěry, omítky a nástřiky a také obklady. [18]

### **3.6. Zkoušky požární odolnosti**

Zkoušení požární odolnosti můžeme rozdělit do tří částí a to Základní požadavky, Alternativní požadavky a ověřování charakteristik pecí.

Zařízení pro provádění zkoušek se stává v zásadě ze speciálně konstruované pece pro vystavení zkušebnímu vzorku zkušebními podmínkami. Řídícího zařízení umožňujícího řízení teploty v peci podle požadavků. Zařízení pro řízení a monitorování tlaku horkých plynů v peci podle požadavků. Rám pro osazení zkušebnímu vzorku, který může být připevněn k peci tak, aby bylo možno vytvořit vhodné podmínky ohřívání, tlaku a podepření. Zařízení pro příslušné zatížení a vetknutí zkušebnímu vzorku, včetně řízení a monitorování zatížení. Přístroj pro měření teploty v peci a na neohřívané straně zkušebnímu vzorku, v případě potřeby i uvnitř zkušebnímu vzorku, pro měření deformace zkušebnímu vzorku a hodnocení celistvosti zkušebnímu vzorku a pro zajištění shody s kritérii chování. Sondu pro průběžné měření času a měření koncentrace kyslíku v pecních plynech

Zkušební pec se konstruuje na kapalná nebo plynná paliva a musí být schopna ohřívát svislé nebo vodorovné dělicí prvky z jedné strany, ohřívát sloupy ze všech stran, stěny z více než jedné strany nebo nosníky ze tří nebo čtyř stran s ohledem na daný případ. Pro specifikované prvky mohou být požadovány jiné speciální pece. Vyzdívka pece musí být z materiálů o objemové hmotnosti menší než  $100 \text{ kg/m}^3$ . Tyto vyzdívkové materiály musí mít nejmenší tloušťku 50 mm a musí zahrnovat alespoň 70% vnitřně ohřívání povrchu pece. Pec musí být schopna zajistit normové podmínky požárního namáhání s ohledem na tepelné působení a tlak. Pece mohou být konstruovány tak, aby mohly být současně zkoušeny soustavy více než jednoho prvku za předpokladu, že lze splnit všechny požadavky pro každý jednotlivý prvek.

Zatěžovací zařízení musí být schopné vystavit zkušební vzorek zatížení. Zatížení lze aplikovat hydraulicky, mechanicky nebo pomocí závaží. Musí být schopné napodobovat podmínky rovnoměrného zatížení, bodového zatížení,



soustředného zatížení, osového zatížení nebo excentrického zatížení beze změny jeho rozdělení a při dodržení největší deformace a rychlosti deformace zkušebního vzorku až do porušení nosnosti nebo po dobu trvání zkoušky, podle toho, co nastane dříve. Nesmí znatelně ovlivnit přestup tepla vzorkem ani omezit použití izolačních krytek termoelektrických článků. Nesmí bránit měření povrchové teploty a/nebo deformaci a musí umožňovat celkové pozorování neohřívané strany. Celková plocha styčných míst mezi zatěžovacím zařízením a povrchem zkušebního vzorku nesmí přesáhnout 10% z celkové plochy povrchu vodorovného zkušebního vzorku.

Pro vyvození okrajových a podpěrných podmínek, odpovídajících zkušebním vzorkům musí být použity speciální zkušební rámy nebo jiné prostředky. Různé typy vzorků vyžadují zkušební rámy s různou tuhostí. Chování zkušebních rámu se posuzuje vyvození roztažné síly v rámu v polovině rozpětí mezi dvěma protilehlými prvky a měřením zvětšení vnitřního rozměru. Zvětšení nesmí přesáhnout 5 mm při aplikované síle 25 kN. Toto posouzení se provede v obou směrech rámu.

Přístroje pro měření teploty v peci můžeme použít řadou zařízení, kterými mohou být termoelektrické články v peci, termoelektrické články na neohřívaném povrchu, vnitřní termoelektrické články nebo termoelektrický článek pro teploty okolí.

Teplota v peci je udaná křivkou ohřívání. Průměrná teplota v peci z měření jednotlivých termoelektrických článků se monitoruje a řídí tak, aby sledovala vztah daný normou.

Tlak v peci je ovlivněn hlavně účinkem přirozené těkavosti plynů. Pro účely řízení tlaku lze předpokládat, že růst tlaku bude přibližně 8,5 Pa na 1m výšky pece. Systém měření tlaku musí být takový, aby vyloučil rychlé změny tlaku spojené s turbulencí. Tlak v peci musí být stanoven relativně k tlaku vně pece v téže výšce. Tlak k peci se trvale sleduje a řídí. Po 5 minutách od počátku zkoušky bude tlak v peci v toleranci  $\pm 5$  Pa jmenovitého tlaku specifikovaného pro konkrétní zkoušený prvek, o 10 minut později v toleranci  $\pm 3$  Pa jmenovitého tlaku specifikovaného pro konkrétní zkoušený prvek. Pro zkušební vzorek, který hoří rychle, může být odchylka přesahující výše uvedené tolerance specifikovaného tlaku pece překročena po dobu nejvýše 5 minut za předpokladu, že je tento přesah

odchyly zřetelně označen jako náhlé zapálení významného množství hořlavých materiálů zvyšující tlak v peci.

Atmosféra v peci je poměr dodávky palivo/vzduch k hořákům a přívod sekundárního vzduchu musí být nastaven tak, aby při zkoušení vzorků bez hořlavých součástí byl obsah kyslíku v atmosféře pece nejméně 4%. Toto nastavení poměru palivo/vzduch hořáků, včetně přívodu sekundárního vzduchu, se nesmí po posledním ověření charakteristiky pece měnit.

Zkušební vzorek, případně zkušební konstrukce se osadí do speciálního zkušebního rámu zkonstruovaného tak, aby reprodukoval požadované nebo návrhové okrajové podmínky a podmínky podepření. Typ zkušebního rámu a jeho požadované chování se liší podle zkoušeného prvku.

Teplota okolního vzduchu musí být na počátku zkoušky v rozsahu 10-40°C. Tato teplota se sleduje ve vodorovné vzdálenosti 1 -3 m od neohřívané strany použitím zařízení za takových podmínek, aby senzor nebyl ovlivněn tepelnou radiací od zkušebního vzorku a/nebo pece.

Při zkoušce nemá teplota ve zkušebně poklesnout o více než 10 K nebo vzrůst o více než 20 K pro všechny požárně dělící prvky, pokud tyto prvky nadále vyhovují kritérii tepelné izolace.

Požaduje se, aby zkušební vzorek byl ve skutečné velikosti. Nemůže-li být vzorek odzkoušen ve skutečné velikosti, musí být jeho velikost v souladu se specifickou zkušební metodou.

Materiály použité na konstrukci zkušebního vzorku musí reprezentovat jeho použití v praxi. Je důležité uvažovat všechny příslušné povrchové úpravy a upevňovací prostředky, které jsou podstatnou součástí vzorku a které mohou ovlivnit jeho chování při zkoušce. Jednotlivý zkušební vzorek nesmí obsahovat žádné konstrukční varianty. Jakékoliv úpravy provedené za účelem osazení zkušebního vzorku do předepsaného zkušebního rámu mají být takové, aby neměly významný vliv na chování zkušebního vzorku, a musí být plně popsány ve zkušebním protokolu. [19]

### 3.7. Příklad požární odolnosti tunelového ostění na již zhotovené stavbě

#### 3.6.1. Královopolské tunely

Největší brněnský komplex silničních tunelů se nachází v katastrálním území Žabovřesky a Královo pole. Je tvořena dvěma tubusy ražených tunelů samostatně ražených pro každý směr. Kromě nich je součástí také více než 450 stavebních objektů a provozních článků. Vzhledem k složitosti výstavby díky husté zástavbě s velkým množstvím inženýrských sítí a dopravních komunikací na povrchu a také k těžkým geologickým podmínkách neogenních jílu řadíme stavbu Královopolských tunelů k velice speciálním a ojedinělým stavbám v České republice. Královopolské tunely se skládají z dvou celků. Královopolský tunel I s celkovou délkou 1237 metrů se nachází pod ulicí Dobrovského. Ražené části dlouhé 1019 metrů navazují na hloubené části vybudované v zapažených jámách dlouhé 218 metrů. Královopolský tunel II měří 1258 metrů, je veden paralelně s Královopolským tunelem I ve vzdálenosti 70 metrů. Ražené části měří 1060 metrů a hloubené 198 metrů.

<b>Základní šířka jízdních pruhů v tunelu</b>	<b>3,5 m</b>
<b>Světlá pojezdová výška</b>	4,5 m
<b>Světlá šířka mezi obrubníky</b>	8,5 m
<b>Plocha dopravního prostoru</b>	57,95 m <sup>2</sup>
<b>Prostor pro odsávání znečištěného vzduchu</b>	12 m <sup>2</sup>
<b>Primární ostění tloušťky 350 mm</b>	11,95 m <sup>3</sup> /bm
<b>Sekundární ostění tloušťky 400 mm</b>	32,53 m <sup>3</sup> /bm
<b>Výrubový profil tunelu</b>	135 m <sup>2</sup>

*Tabulka 4 – základní technické parametry*

Předností Královopolských tunelů je především bezpečnostní vybavení, které je srovnatelné s nejlepšími evropskými standardy. Jsou vybaveny vysoce výkonným automatickým odvětráváním a odsávání znečištěného vzduchu. Výhoda tohoto větracího systému je v případě vypuknutí požáru, kdy je systém schopný odsát 250 m<sup>3</sup> vzduchu za sekundu z jakékoli části tunelu. Přednostmi vyniká i systém osvětlení a to včetně nouzových režimů, které jsou schopny přizpůsobit se podmínkám v tunelu a okolí. V tunelu je možno reagovat na aktuální dopravní situaci, odklonu dopravy nebo umožnění obousměrného provozu v případě oprav jedné z tunelových rour. Systém je také specifický díky SOS skříním, díky kterým se dokáží lehce spojit se složkami záchranného systému.

Napájení a řízení tunelů je plně zálohované. V tunelech jsou k dispozici zařízení na měření rychlosti, počtu vozidel a přes 40 kamer mapující dopravní stav. Součástí je také elektronická požární signalizace, která je součástí videodetekce požáru. [20]

Primární ostění bylo vyrobeno ze stříkaného betonu třídy C20/25 J2 D max = 8mm S4 C10,2, CEM I 42,5 R Mokrý a přísady společnosti Sika.

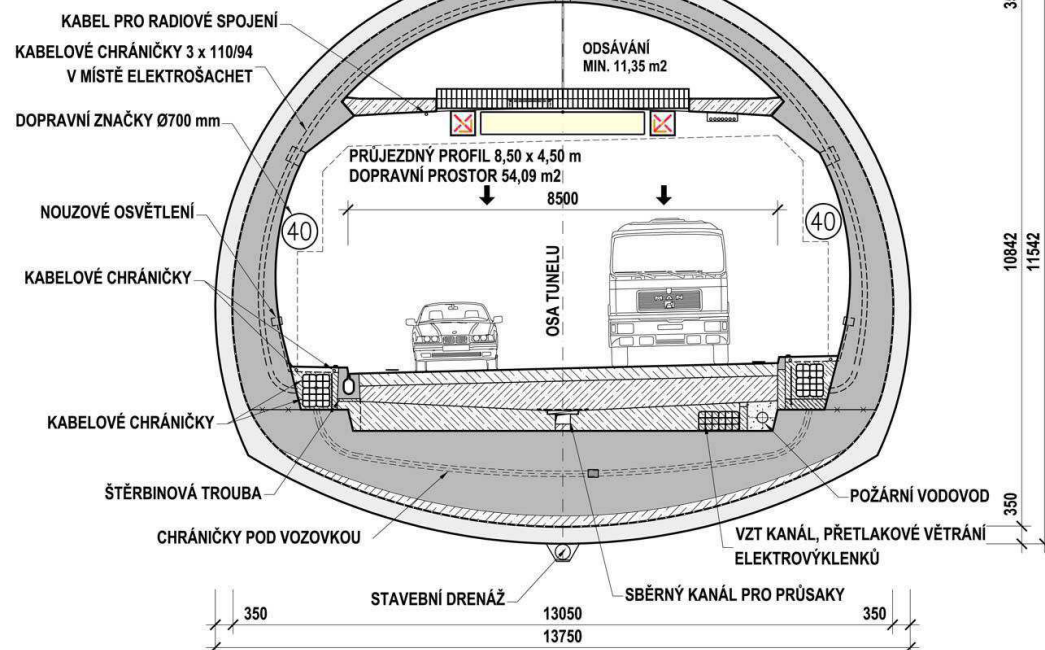
Beton použitý na výrobu protiklenby třídy C 30/37 S4 D max=16mm C10,2, CEM III/A 32,5 R – Mokrý a přísady společnosti Sika.

Definitivní ostění bylo vyrobeno z betonu třídy C 30/37 XF2 S D max=16mm C10,2. Tento beton je požárně odolný. Použitý cement byl CEM I 42,5 R Mokrý, přísady společnosti Sika a polypropylenová vlákna.

Jako jeden z mála tunelů v České republice splňuje Královopolský tunel požadavky na požární odolnost betonu. Ty byly měřeny na vzorku o rozměrech 3,3m x 3m x 0,5m. Vzorek se postupně zatěžoval narůstající teplotou. Průběh teplot v betonu se měřil ve třech místech hloubky a to v 50mm, 100mm a 150mm vždy od líce vzorku. Podmínkou této zkoušky je, že hloubka výskytu hlavní nosné výztuže nesmí překročit teplotu 360°C po dobu 180 minut. Zkouška požární odolnosti betonu byla testována na několika druzích betonu s použitím polypropylenových vláken. Zkoušky prokázaly, že vlákna různých druhů zlepšují požární odolnost betonu. Díky těmto zkouškám byla vytvořena nejlepší receptura pro výrobu tohoto betonu. [21]

## RAŽENÝ TUNEL - ZÁKLADNÍ PROFIL

KATEGORIE TUNELU: T - 8,5  
PLOCHA VÝRUBU: 127,88 m<sup>2</sup>



Obrázek 5 – řez tunelového tubusu Královopolských tunelů

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bakalářské práce byl návrh receptury betonu pro tunelová ostění se zvýšenou odolností proti působení vysokých teplot způsobených požárem. Důraz byl kladen na požadavky posouzení vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. U čerstvého betonu byly provedeny zkoušky stanovení konzistence čerstvého betonu sednutím, zkouška a zkouška objemové hmotnosti. Na ztvrdlém betonu byla testována objemová hmotnost, pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech a pevnost v tahu ohybem. Dále byly vzorky vysušeny, uloženy do pece a zatěžovány na teplotu 600 °C a 1000 °C. Nárůst teploty byl 10°C/minutu, poté výdrž 30 minut a ochlazení. Vzorky byly podrobeny RTG analýze. Dále byla provedena zkouška vystavení materiálu přímému kontaktu s ohněm a porovnání snímků pro vzorky zatížené a nezatížené plamenem.

V rámci této části byla vytvořena metodika zkoušení požární odolnosti betonu v laboratorních podmínkách omezených vybavením a prostorem zkoušení. Metodika je rozdělena na dvě části, při které sledujeme chování betonu v peci a chování betonu vystaveného přímým plamenem.

## 4.1. Použité materiály

### 4.1.1 Cement

Při výrobě betonu v rámci experimentální části byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R firmy Českomoravský cement a.s. – cementárna Mokrý

Druh cementu	2 denní pevnost [MPa]	28 denní pevnost [MPa]
CEM I	27,5	53,0

*Tabulka 5 – složky CEM I 42,5 R Mokrý*

### 4.1.2. Kamenivo

Celkem byly použity 3 frakce kameniva

- drobné těžené kamenivo frakce 0 – 4 mm, Žabčice
- hrubé drcené kamenivo frakce 4 – 8mm, Olbramovice
- hrubé drcené kamenivo frakce 8 – 16 mm Olbramovice

#### 4.1.2.1 Objemová a sypná hmotnost

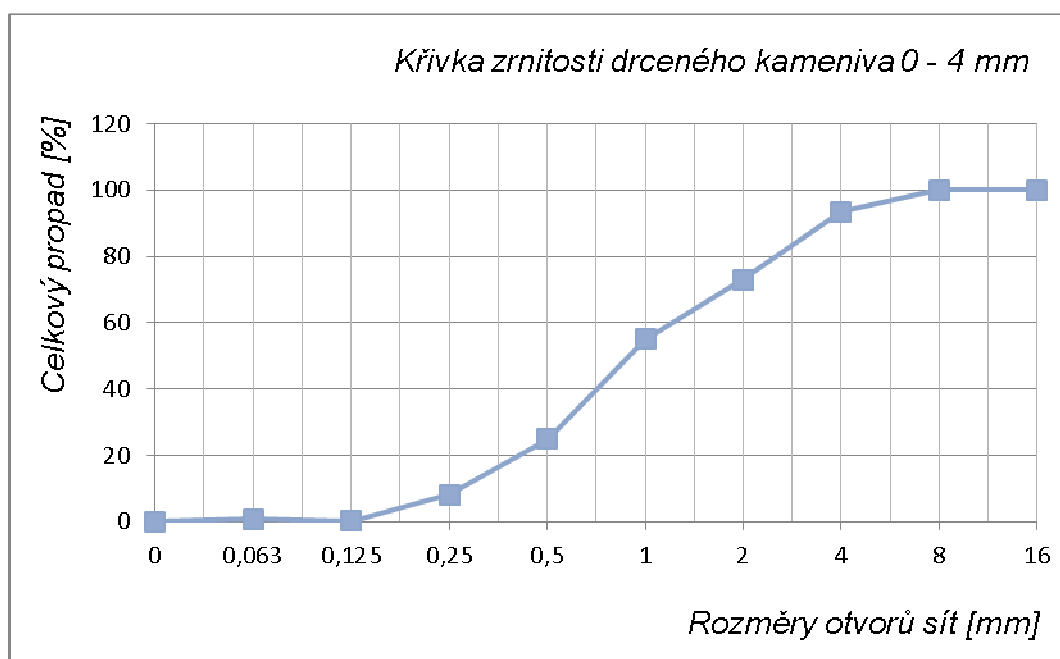
Frakce	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Sypná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Obsah tuhých částic do 0,25 [%]
0 - 4	2550	2020	7,8
4 – 8	2740	1910	0,6
8 - 16	2720	1890	0,2

*Tabulka 6 – objemová a sypná hmotnost kameniv*

#### 4.1.2.1. Sítové rozborů kameniva

Drobné kamenivo 0 – 4 mm					
Kontrolní síto [mm]	Dílčí zbytek [mm]	Zbytek [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [g]	Podíl frakcí [%]
16	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0	
4	58,6	6,5	6,5	93,5	
2	186,0	20,6	27,1	72,9	91,9
1	162,0	17,9	45,0	55,0	
0,5	273,5	30,2	75,2	24,8	
0,25	152,4	16,7	91,9	8,1	
0,125	64,7	7,1	99,0	0,1	8,1
0,063	1,5	0,2	99,2	0,8	
0	7,3	0,8	100,0	0,0	
kontrola	906,0	100,0			100,0

Tabulka 7 – síťový rozbor kameniva 0 – 4 mm

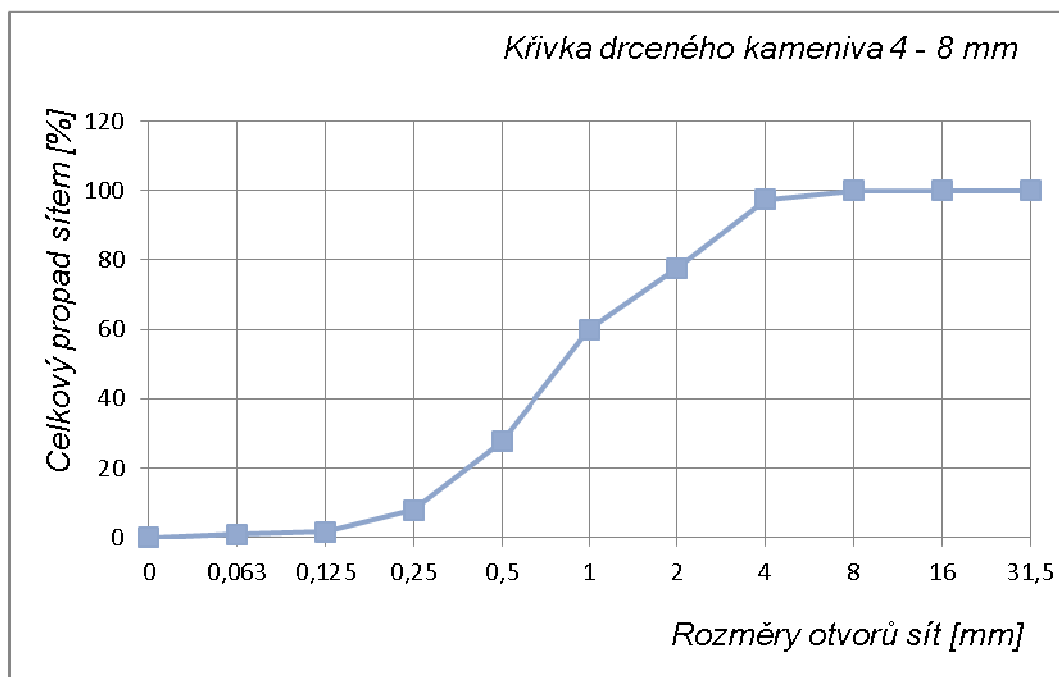


Graf 2 – křivka zrnitosti kameniva 0 – 4 mm



Hrubé kamenivo 4 – 8 mm					
Kontrolní síto [mm]	Dílčí zbytek [mm]	Zbytek [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [g]	Podíl frakcí
16	0,0	0,0	0,0	100,0	9,2
8	90,5	9,2	9,2	90,8	
4	826,3	84,5	93,7	6,3	90,2
2	43,8	4,4	98,1	1,9	
1	6,6	0,7	98,8	1,2	
0,5	3,4	0,3	99,1	0,9	
0,25	2,5	0,3	99,4	0,6	
0,125	1,7	0,2	99,6	0,4	0,6
0,063	0,6	0,1	99,7	0,3	
0	2,6	0,3	100,0	0,0	
kontrola	978,0	100,0			100,0

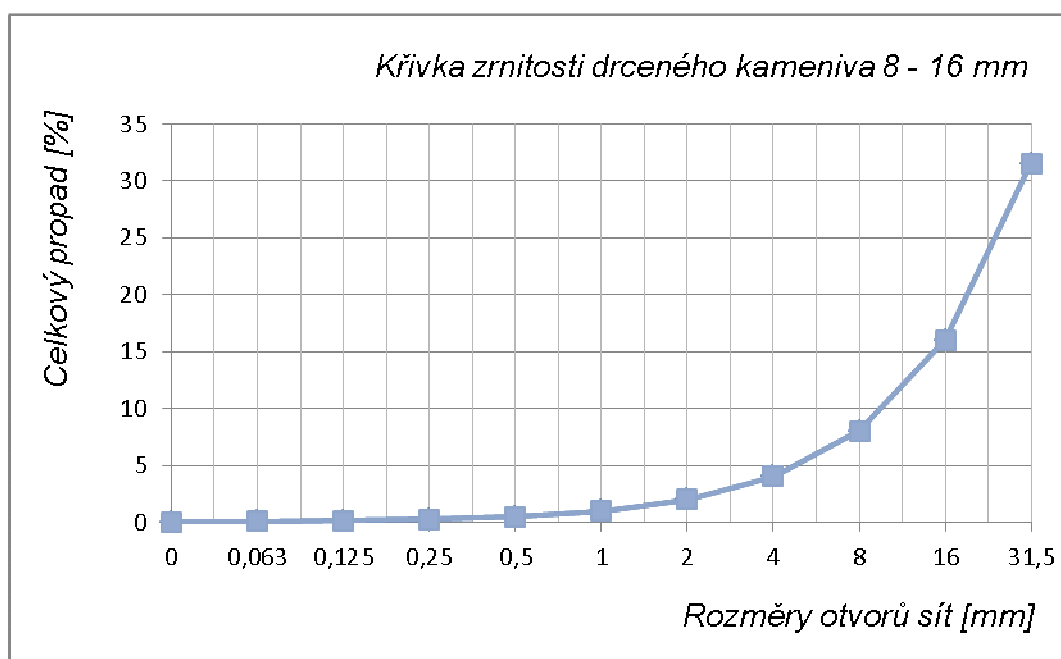
Tabulka 8 – síťový rozbor kameniva 4 – 8 mm



Graf 3 – křivka zrnitosti kameniva 4 – 8 mm

Hrubé kamenivo 8 – 16 mm					
Kontrolní síto [mm]	Dílčí zbytek [mm]	Zbytek [%]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [g]	Podíl frakcí
16	208,6	18,3	18,3	81,7	97,8
8	905,7	79,5	97,7	2,3	
4	25,1	2,1	99,9	0,1	2,1
2	0,0	0,0	99,9	0,1	
1	0,0	0,0	99,9	0,1	
0,5	0,0	0,0	99,9	0,1	
0,25	0,0	0,0	99,9	0,1	
0,125	0,1	0,0	100,0	0,0	0,1
0,063	0,2	0,0	100,0	0,0	
0	0,3	0,0	100,0	0,0	
kontrola	1140,0	100,0			100,0

Tabulka 9 – síťový rozbor kameniva 8 – 16 mm



Graf 4 – křivka zrnitosti kameniva 8 – 16 mm

## 4.2. Složení betonu

Pro výrobu betonu byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R (Českomoravský cement, a.s. Mokrá), těžené kamenivo 0 – 4 mm (Žabčice), drcené kamenivo 4 – 8 mm (Olbramovice) a drcené 8 - 16 mm (Olbramovice). Záměsová voda byla použita z vodovodního řádu. Pro zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu byla použita Plastifikační přísada byla Sika Viscocrete 4035 v běžném dávkování 0,5 – 0,6% z hmotnosti cementu. Do jednotlivých receptur byly přidávány další složky pro zlepšení vlastností jak čerstvého tak ztvrdlého betonu. Polypropylenová vlákna Fibermesh 150 , skleněné vlákna ANTI-Crak HP 12 mm, drátky Crampe Harex DE 50/0,8 N. Pro redukci množství cementu byl použit elektrářenský popílek z Dětmovic, který byl nahrazen v dávce 15% z dávky cementu.

Receptura	REF	P1	P2	S	D	P1+D	P1+P
CEM I 42,5 R Mokrá	420	420	420	420	420	420	357
HTK 0 – 4 mm	850	850	850	850	850	850	850
HDK 4 – 8 mm	340	340	340	340	340	340	340
HDK 8 -16 mm	505	505	505	505	505	505	505
voda	180	192	180	180	180	180	180
Sika Viscocrete	2,1	2,1	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52
polypropylenová vlákna	-	1,5	1,5	-	-	1,5	1,5
skelná vlákna	-	-	-	1,5	-	-	-
drátky	-	-	-	-	20	20	-
elektrářenský popílek	-	-	-	-	-	-	63

Tabulka 10 - složení betonu na m<sup>3</sup>

*Poznámka:*

*REF – referenční beton, P1 – beton s polypropylenovými vlákny, P2 – beton s polypropylenovými vlákny, S – beton se skleněnými vlákny, D – beton s drátky, P1+D – beton s polypropylenovými vlákny a drátky, P1+P – beton s polypropylenovými vlákny a elektrářenským popínkem*

### 4.3. Metodika práce

Jednotlivé vstupní suroviny byly po zvážení postupně dávkovány do bubnové míchačky. Jako první bylo homogenizováno kamenivo všech frakcí a poté cement. Při míchání receptur s vlákny jsme surovinu přidali do míchačky při homogenizaci kameniva. Po důkladném promíchání všech suchých složek byla přidána voda a plastifikační přísada. U receptur s drátky byla surovina dávkována až po promíchání s vodou a plastifikační přísadou. Čerstvý beton byl uložen do forem pro zvolené zkoušky ztvrdlého betonu. Formy byly plněny ve dvou vrstvách a zhutněny na vibračním stole. U každé z receptury bylo vyrobeno 12 krychlí (100 x 100 mm), 4 krychle (150 x 150 mm) a 2 trámce (100 x 100 x 400 mm).

U čerstvého betonu byly provedeny zkoušky:

- stanovení konzistence čerstvého betonu sednutím (ČSN EN 12350 – 2), s požadovaným stupněm sednutí S4
- zkouška rozlitím (ČSN EN 12350 – 5) požadované třídy F3
- zkouška objemové hmotnosti (ČSN EN 12350 – 6).

U ztvrdlého betonu byly provedeny zkoušky:

- pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech (ČSN EN 12390 -3)
- pevnost v tahu za ohybu (ČSN EN 12390 – 5)
- zkouška objemové hmotnosti (ČSN EN 12390 – 7)
- teplotní zkouška v peci
- zkouška přímým plamenem

#### 4.4. Výsledky zkoušek

Výsledky zkoušek byly zapsány do tabulek a graficky zpracovány.

##### 4.4.1. Zkoušky čerstvého betonu

###### 4.4.1.1. Zkouška sednutí, rozlití, objemová hmotnost

	REF	P1	P2	S	D	P1+D	P1+P
Sednutí [mm]	190	170	180	180	160	165	180
Rozlití [mm]	430	450	460	410	450	450	465
D [kg/m <sup>3</sup> ]	2280	2240	2260	2250	2290	2270	2250

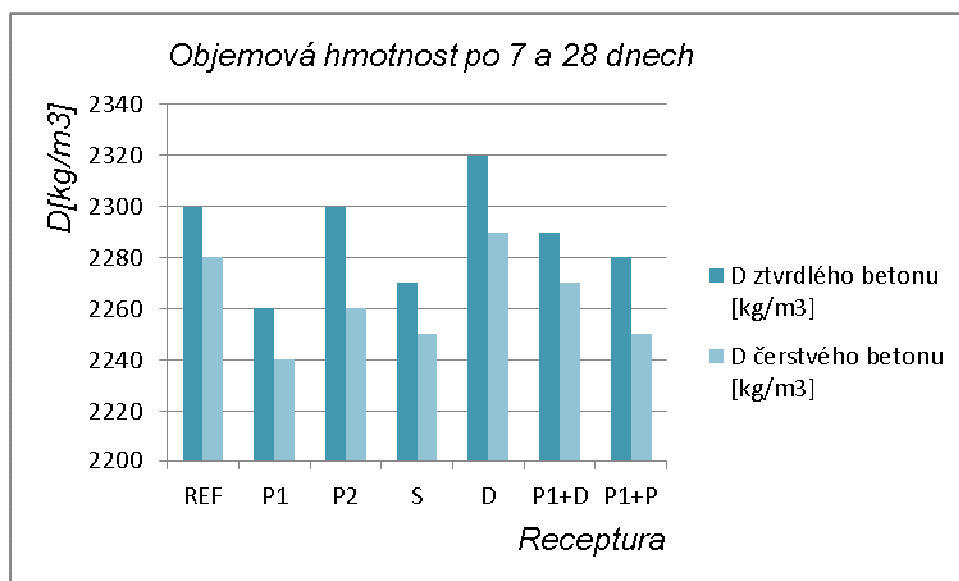
*Tabulka č 11 - zkoušky čerstvého betonu*

##### 4.4.2. Zkoušky ztvrdlého betonu

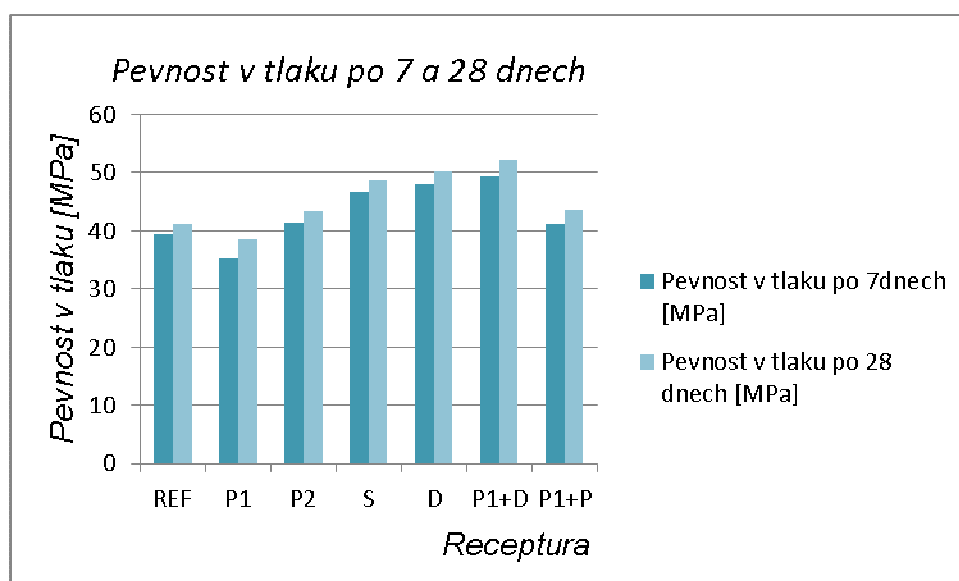
###### 4.4.2.1. Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu

	REF	P1	P2	S	D	P1+D	P1+P
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	39,5	35,3	41,4	46,6	48,0	49,3	41,3
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	41,2	38,5	43,5	48,6	50,2	52,2	43,6
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	3,5	2,9	4,1	5,6	5,8	6,0	5,4
D [kg/m <sup>3</sup> ]	2300	2260	2300	2270	2320	2290	2280

*Tabulka č 12 – zkoušky ztvrdlého betonu*



*Graf 5: objemová hmotnost po 7 a 28 dnech*



*Graf 6: pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech*

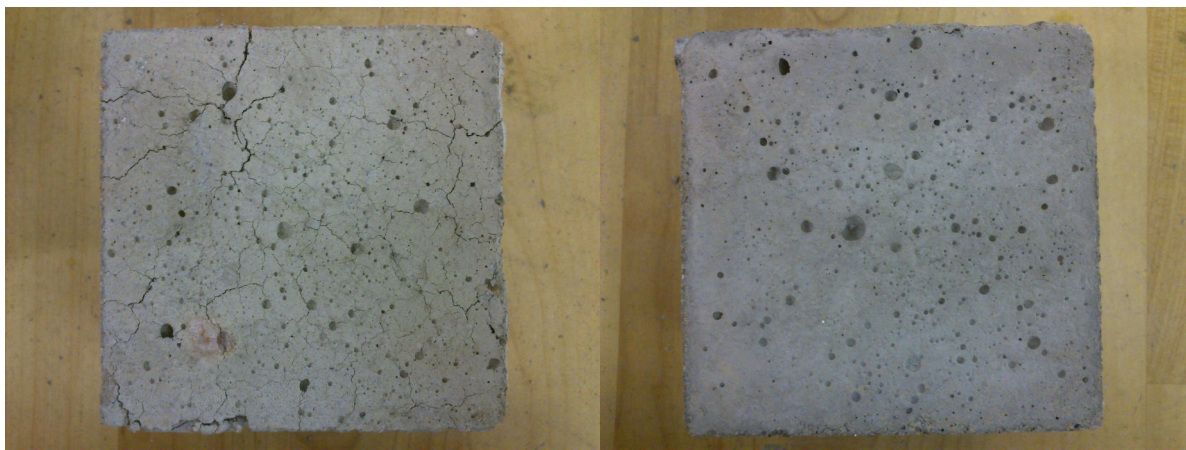
#### 4.4.2.2. Teplotní zatížení v peci

Vzorek každé receptury byl vysušen v sušárně a zatížen na teploty 600°C (vždy obrázek vpravo) a 1000°C (obrázek vlevo). Nárůst teploty byl 10°C/minutu, poté výdrž 30 minut a ochlazení na teplotu okolí. Vzorky byly vizuálně posouzeny a byla na nich provedena RTG analýza.



*Obrázek 6 – referenční receptura*

U referenční receptury již při teplotách 600°C vzniklo množství pórů. Vzorek zahřátý na 1000°C měl ve struktuře mnoho trhlin.



*Obrázek 7 – receptura P1*

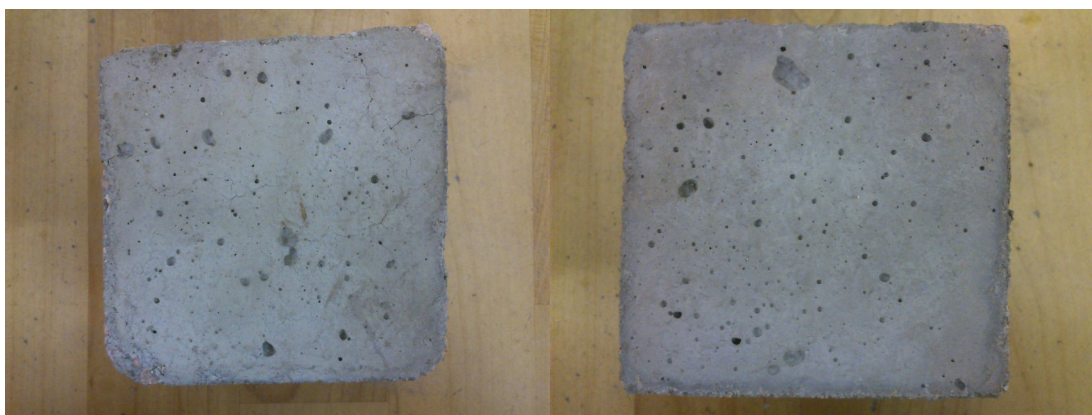


Receptura s vlákny a větším množstvím vody vykazovala velké množství pórů již při teplotách 600°C. Při teplotě 1000°C se na vzorku objevilo množství trhlin, které byly způsobeny velkým množstvím záměsové vody.



*Obrázek 8 – receptura P2*

Receptura s vlákny a menším množstvím vody vykazovala menší množství pórů při teplotě 600°C. Při teplotě 1000°C se na vzorku sice objevily trhliny, nebyly však tak velké jako v předešlé receptuře s větším množstvím vody.



*Obrázek 9 – receptura S*

Receptura se skelnými vlákny vykazovala při obou teplotách nejmenší množství trhlin vzniklých zahříváním v peci. Ve struktuře se objevily makro i mikropóry.





*Obrázek 10 – receptura D*

U receptury, do které byly přidány drátky vzniklo při obou teplotách minimum trhlin i obsahu pórů.



*Obrázek 11 – receptura P1 + D*

Kombinací receptury vláken a drátků se při teplotě 600°C objevily menší póry. Při teplotě 1000°C se na okrajích vzorku vytvořily velké trhliny.



*Obrázek 12- receptura P1 + POP*

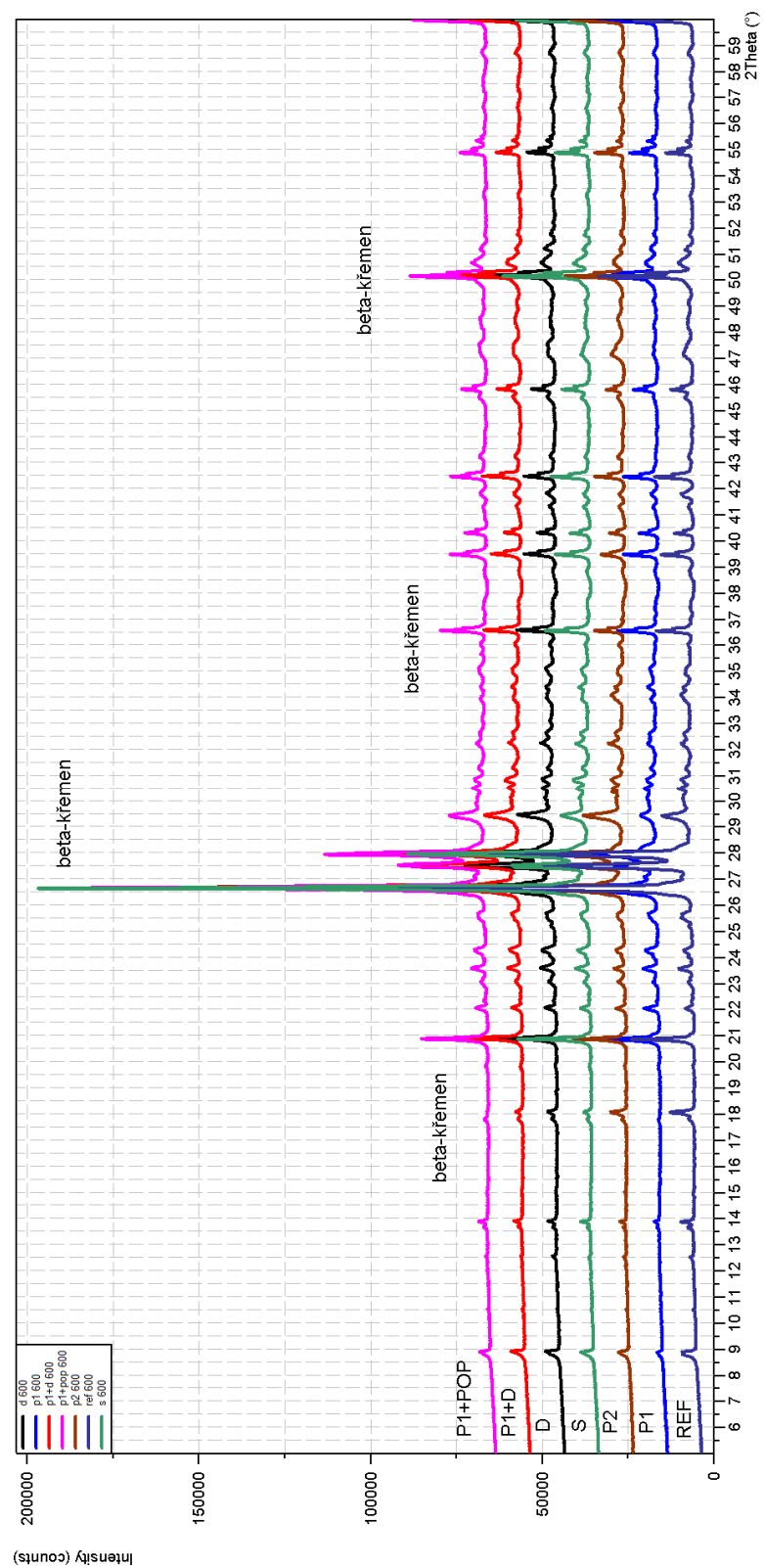
Do poslední receptury byly přidány vlákna a popílek. Struktura betonu nevykazovala ani při jedné teplotě nadměrné množství pórů a trhlin.

#### **4.3.2.3. RTG difrakční analýza**

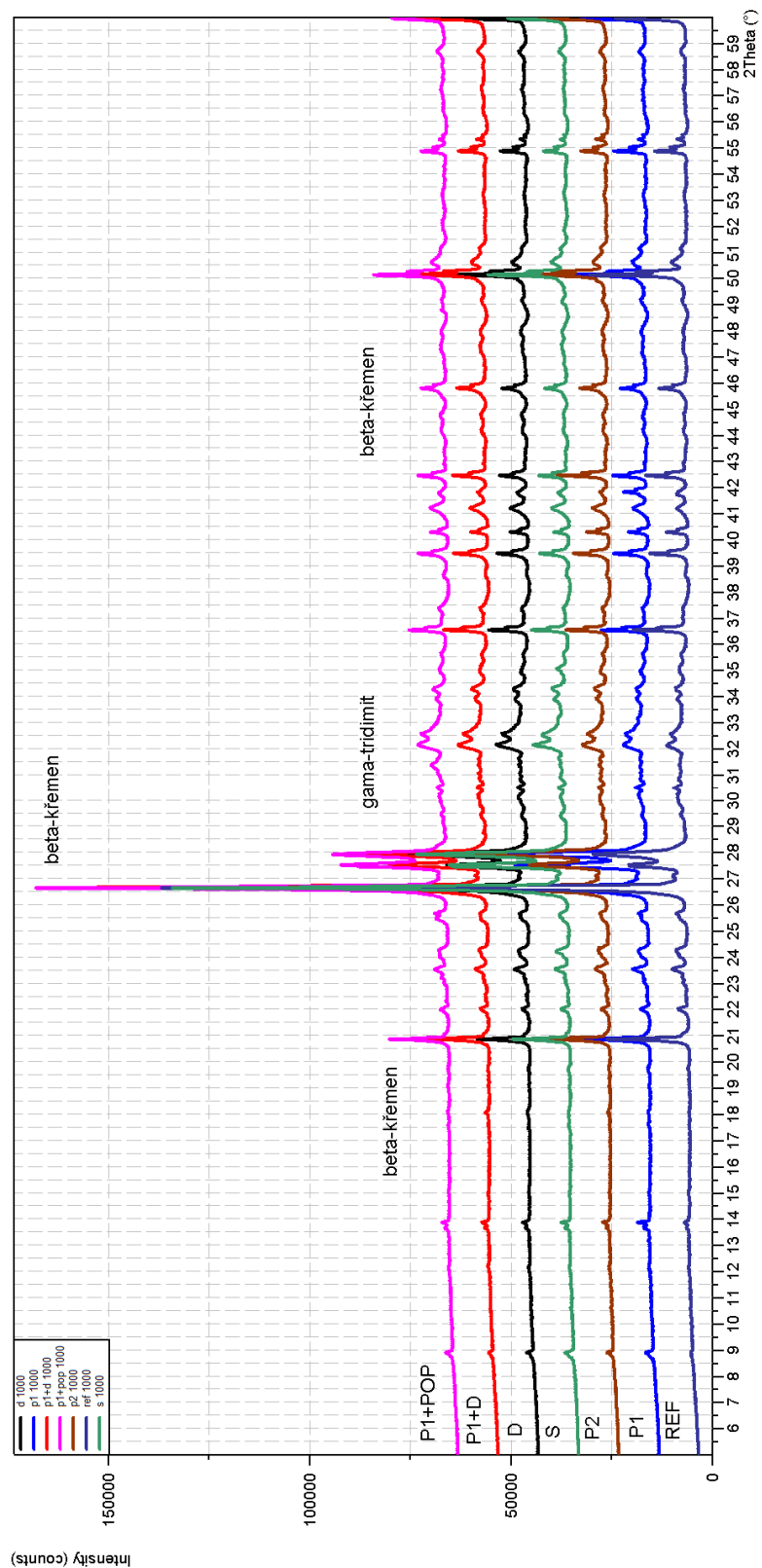
Metoda je založená na interakci rentgenového záření. Pravidelné uspořádání atomů v krystalické mřížce rozptýlí rentgenové paprsky a následně dochází ke vzniku difrakčních maxim. Jejich tvar, intenzita a poloha závisí na druhu atomů a uspořádání v prostoru. Díky této analýze můžeme sledovat krystalické složení materiálu.

Vzorky jednotlivých receptur betonu zatížené v peci na teplotu 600 a 1000 °C byly nadrcen, rozemlety v kulovém mlýně a následně přesity přes síto oka 0,09 mm. Připravené vzorky byly naplněny do nosičů a vystaveny RTG záření prováděné na přístroji Empyrean od firmy Panalytical.

Okolo  $27^\circ 2\theta$  se nachází nejvyšší charakteristický pík beta-křemene. Při vyšší vypalovací teplotě (1000°C) je pozorovatelné snížení jeho intenzity a možná prvotní tvorba vysokoteplotní formy tohoto minerálu. Úplná přeměna na gama tridimit není zcela pozorovatelná z důvodu, že nebylo dosaženo teploty 1050°C.



Graf 7: RTG difrakční analýza všech receptur při teplotě 600 °C

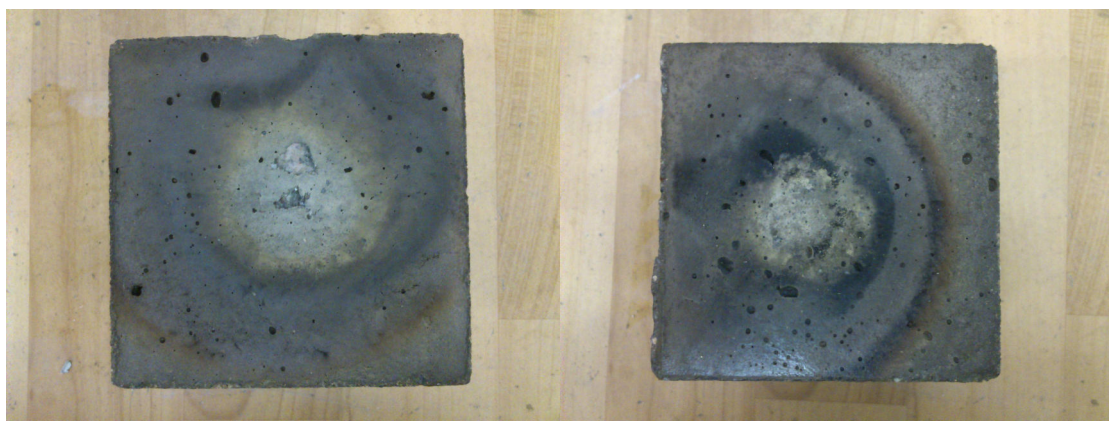


Graf 8 – RTG difrakční analýza všech receptur při teplotě 1000 °C

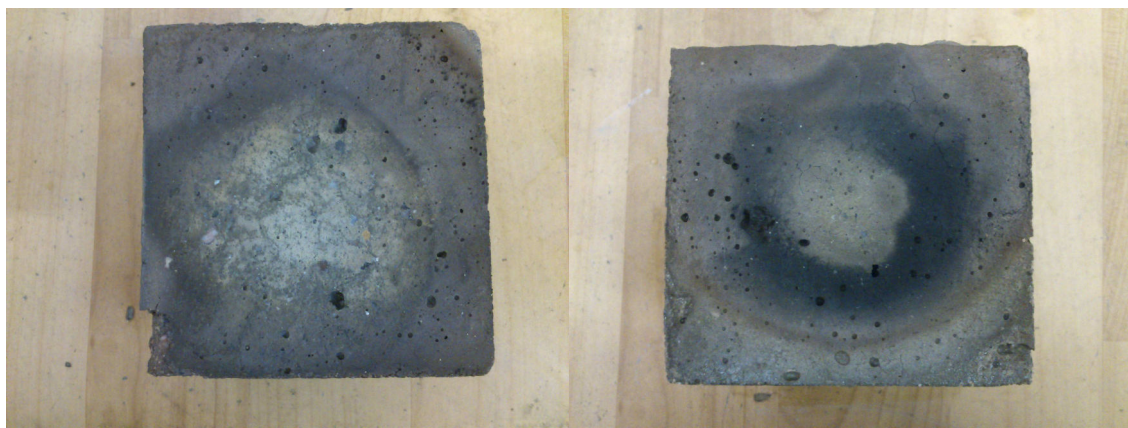


#### 4.4.4. Teplotní zatížení přímým plamenem

Vybrané vzorky byly vystaveny působení přímého plamene pomocí hořáků. Intenzivní zahřívání trvalo 1 hodinu a poté byly vzorky šokově schlazeny ponořením do studené vody. Vzorky vystavené teplotě a následnému ochlazení byly vizuálně zhodnoceny. Poté byly provedena fotografie na tomografu vzorku zatíženého a nezatíženého plamenem.



*Obrázek 13 – receptura REF (vlevo) a S (vpravo)*



*Obrázek 14 – receptura P1 (vlevo) a P1 + P (vpravo)*



*Obrázek 15 – zatížení vzorků přímým plamenem*

Receptura	Nezatížený plamenem	Zatížený plamenem
Referenční	41,2 MPa	28,3 MPa
Skelná vlákna	48,6 MPa	33,8 MPa
Polypropylenová vlákna	43,5 MPa	30,1 MPa

*Tabulka – srovnání pevností v tlaku vzorků zatížených a nezatížených přímým plamenem*

#### **4.5. Navržená metodika zkoušek testování**

Při zkoušení požární odolnosti betonu se používají předepsané pece na velkorozměrové zkušební vzorky. Z důvodu náročnosti nejen manipulace, ale i finanční byla navržena metodika pro zkoušení v laboratorních podmínkách při omezeném zkušebním prostoru a vybavení.

Navržená metodika zkoušení betonu pro tunelové ostění se skládá z dvou různých teplotních zatížení. První část metodiky se zabývá možností vypálení vzorku na danou teplotu v peci. U druhé části je vzorek vystaven přímému plameni. Vzorky jsou následně postupně chlazeny, přirozeně na okolní teplotu nebo šokově schlazeny.

Zkušební tělesa pro teplotní zatížení v peci se nechají vysušit v sušárně po dobu 24 hodin a poté se připraví na teplotní zatížení v peci. Většina menších zkušeben má k dispozici pouze keramické pece, které nejsou schopny simulovat zatížení dle teplotní křivky pro tunely, kdy se teplota během prvních 5 minut vyšplhá na 1200°C s teplotní výdrží po dobu 30 minut a potom dochází k pozvolnému chlazení na okolní teplotu. Běžné laboratorní pece jsou schopny zatěžovat v intervalech 10 – 20 °C /minutu. Vzhledem k pomalejší rychlosti zatížení zvětšíme dobu výdrže, která může být 1 - 2 hodiny a poté se vzorky postupně chladí. Na zkušebních tělesech můžeme stanovit množství betonu vzniklé explozivním odprýskáním, velikost trhlin, pevnost v tlaku, změnu objemové hmotnosti a nasákavost. Po teplotním zatížení můžeme dále určit zkoušky RTG nebo DKTA analýzy, při kterých můžeme zkoumat modifikační přeměny v betonu. Důležitou zkouškou je také dále schopnost vedení tepla skrz materiál, tedy výpočet součinitele tepelné vodivosti.

U zkoušení odolnosti vzorků vystavených plamenem používáme hořák s plynovým médiem. Vzorky zatěžujeme po dobu 1 hodiny z jedné strany. Během zkoušky sledujeme teplotu vzorku pomocí teplotních čidel nebo laserového teploměru. U této metody je možné rozdílné chlazení vzorků. První sada vzorků je přirozeně chlazená vzduchem na okolní teplotu. Další vzorky jsou ihned po teplotním zatížení vhozeny do studené vody a šokově schlazeny. Tělesa jsou dále podrobena RTG analýze. U prudce ochlazených zkušebních vzorků simulujeme hašení záchranných jednotek a schopnosti betonu odolávat prudkým změnám teplot nejen prudkého zvýšení v případě požáru, ale také následného intenzivního chlazení. Díky těmto výsledkům můžeme upravit složení betonu a pomocí zlepšení dávkování nebo přidání použitých surovin můžeme beton připravit na prudké teplotní výkyvy. Odolnost betonu po prudkém ochlazení je důležitá především pro následné diagnostické zkoušky a možné úpravy betonového ostění tunelů pro rekonstrukci tunelu po zasažení požárem. Na zatížených zkušebních tělesech můžeme stanovit pevnost v tlaku, RTG difrakční analýzu nebo DKTA analýzu. Dále můžeme vzorky zatížené a nezatížené plamenem vyfotit na tomografu a sledovat změny struktury.

## 5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Při výrobě čerstvého betonu byl požadovaný stupeň sednutí S3 a požadovaný stupeň rozlití F4. Všechny receptury požadované hodnoty splnily. Pro lepší tekutost směsi byla přidána plastifikační přísada. Dávkování u referenčního betonu činila 0,5% z hmotnosti cementu, při výrobě dalších receptur obsahující vlákna byla zvýšena na 0,6% z hmotnosti cementu z důvodu lepší zpracovatelnosti čerstvého betonu.

U receptur s polypropylenovými vlákny bylo vytvořeno srovnání v dávkování vody a plastifikační přísady. V receptuře P1 byl kvůli zlepšení tekutosti čerstvého betonu zvýšen vodní součinitel z 0,43 na 0,5 a v receptuře P2 byl zvýšen obsah plastifikační přísady z 0,5 na 0,5% z hmotnosti cementu. Rozdíly v recepturách se projeví především na pevnostech, kdy receptura P1 obsahující větší množství vody vykazovala menší pevnosti v tlaku a to 38,5 MPa na rozdíl od receptury s přidaným množstvím plastifikační přísady, jejíž pevnost byla 43,5 MPa. Další odlišné chování vykazoval beton při teplotním zatížení v peci. Z důvodu rychlejšího odpařování vody ve struktuře vznikly na vzorcích velké póry a trhliny.

Z důvodu velkého množství cementu ve všech recepturách nabyly pevnosti v tlaku již po 7 dnech výrazných hodnot. Nejvyšší pevnosti vykazovaly receptury s drátky nebo rozptýlenou výztuží ve formě vláken. Po 28 dnech se pevnosti v tlaku u všech receptur zvětšily. Pevnost v tlaku referenčního betonu byla 41,5 MPa, zatímco u vyztuženého betonu vlákny se pohybovala v 43,5 – 52,2 MPa, což je 5 – 10 % zvýšení. Pevnosti v tahu za ohybu byly prováděny na trámciích po 28 dnech. Nejvyšší hodnoty byly stanoveny u drátkobetonů a to 6,0 MPa. Objemové pevnosti čerstvého betonu se pohybovaly v rozmezí 2240 – 2290 kg/m<sup>3</sup> u ztvrdlého betonu se objemová hmotnost zvýšila v rozmezí 2260 – 2320 kg/m<sup>3</sup>.

Další zkouškou prováděnou na ztvrdlém betonu byla teplotní zkouška v peci. Vzorek referenční receptury měl na povrchu velké množství trhlin a pórů. U vzorků, do kterých byly přidány polypropylenová vlákna byl výskyt pórů i trhlin menší. Nejlepší vizuální efekt měla receptura se skelnými vlákny, která měla povrch téměř bez trhlin s občasným výskytem pórů.



Vzorky všech receptur byly podrobeny RTG difrakční analýze. Okolo  $27^{\circ} 2\theta$  se nachází nejvyšší charakteristický pík beta-křemene. Při vyšší vypalovací teplotě ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) je pozorovatelné snížení jeho intenzity a možná prvotní tvorba vysokoteplotní formy tohoto minerálu.

Dále se vzorky zatěžovaly přímým plamenem pomocí hořáků. Po hodinovém zahřívání přímým plamenem byly vzorky šokově ochlazeny a byly na nich provedeny pevnosti v tlaku. Pevnost u betonu, který nebyl zahříván plamenem byla v rozmezí od 41,2 – 48,6 MPa, u zahříváných vzorků se pevnost v tlaku snížila o více než 30% a to na rozmezí 28,3 – 32,8 MPa.

## 6. ZÁVĚR

Požární odolnost betonu patří v dnešní době k jednomu z nejdůležitějších kritérií při výstavbě tunelů. Bakalářská práce byla zaměřena na shrnutí všeobecných poznatků z oblasti požární odolnosti pro tunelová ostění a možnosti, které přispívají k jejímu zvyšování.

V rámci teoretické části bylo popsáno chování jednotlivých složek betonu při požáru. Dále byla popsána možnost zlepšení požární odolnosti, kdy do betonu přidáváme rozptýlenou výztuž.

Experimentální část práce dokázala, že přídavek rozptýlené výztuže ve struktuře betonu napomáhá materiálu odolávat vlivu vysokých teplot. Receptury s přidanou rozptýlenou výztuží vykazovaly po teplotním zatížení v peci menší množství trhlin i pórů. Materiál byl kompaktnější a nevykazoval větší známky poškození. S přidáním vláken se také omezil vznik explozivního odprýskávání. Kladný vliv měl přídavek rozptýlené výztuže i na pevnostní charakteristiky betonu. Mezi nevýhody přidávání vláken do čerstvého betonu patří zvýšení množství plastifikační přísady pro zlepšení konzistence betonu. V rámci experimentální části byla rovněž vytvořena metodika zkoušení protipožárních betonů v omezených laboratorních podmínkách s možností co nejobjektivnějších výsledků.

## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZAPAŘKA, J. Bezpečnost při požáru v tunelu. *Časopis stavebnictví* [online]. Brno 2007. Dostupné z [http://www.casopisstavebnictvi.cz/bezpecnost-pri-pozaru-v-tunelu\\_N2345](http://www.casopisstavebnictvi.cz/bezpecnost-pri-pozaru-v-tunelu_N2345)
- [2] Promat. *Požární scénáře* [online]. Dostupné z: [http://www.promat1.cz/admin/files\\_upl/3669.pdf](http://www.promat1.cz/admin/files_upl/3669.pdf)
- [3] Manuál silniční tunely. *Protipožární odolnost konstrukce*. [online] Dostupné z <http://tunnels.piarc.org/cs/reakce-na-pozar/odolnost-konstrukce.htm>
- [4] Berčák, P. *Požární odolnost betonového ostění tunelů a jeho zkoušení v ČR*. Tunelářské odpoledne 2009. [online]. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2009\\_04\\_TO/Marik-Bebcak-Pozarni\\_odolnost\\_bet.\\_osteni.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2009_04_TO/Marik-Bebcak-Pozarni_odolnost_bet._osteni.pdf)
- [5] KUPILÍK, V. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha 2006. 111 s.
- [6] HELA, R., BODNÁROVÁ, L., KŘÍŽOVÁ, K., VÁLEK, J. Vytvoření postupů a receptur pro použití betonu s vyšší trvanlivostí vůči působení vysokých teplot v konstrukcích, Dílčí výzkumná zpráva za rok 2010, CIDEAS, listopad 2010
- [7] SIČÁKOVÁ, A a kolektiv, *New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications*, 1. Vydání Košice, červen 2008, 156 str.
- [8] KUPILÍK, V. *Požární bezpečnost staveb*. Praha: ČVUT, 2009. 195 s.
- [9] *Fire design of concrete structures : materials, structures and modelling*. 2007. Lausanne, Switzerland Case Postale, 2007. 91 s.
- [10] Technické kvalitativní podmínky staveb českých drah: *Kapitola 24 – Tunely*. Praha: České dráhy, s.o. – Divize dopravní cesty, o. z., 2006 Dostupné z: [http://pjpk.cz/TKP\\_24.pdf](http://pjpk.cz/TKP_24.pdf)

[11] Technické kvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb pozemních komunikací: *Kapitola 7 – Tunely, pozemní stavby a galerie*. Aktualizované vyd. Praha: Ministerstvo dopravy, odbor infrastruktury, 2006. Dostupné z [http://www.pjpk.cz/TKP-D\\_7.pdf](http://www.pjpk.cz/TKP-D_7.pdf)

[12] HELA, R. Technologie betonu I VUT Brno, Brno 2005

[13] HELA, R. Technologie betonu II VUT Brno, Brno 2007

[14] Havel Composites. *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. [online]. Dostupné z: <http://havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>

[15] KRÁTKÝ J., TRHLÍK T, VODIČKA J,. *Drátkobetonové konstrukce*. 1. Vydání. Praha 1999: Informační centrum ČKAIT. Edice, Betonové stavitelství

[16] Technický list. Sika ViscoCrete 4035

[17] Olson, D. W.: Mineral Commodity Summaries - Graphite (natural) [online]. USA: U.S. Geological Survey, January 2007. Dostupný z: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/graphmcs07.pdf>

[18] CLEMENT, F., ZÁMEČNÍK, M. *Alternativy portipožární ochrany betonového ostění tunelů*. Časopis Tunel, 2007. [online]. Dostupné z: <http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2007/1/tunel-0701-6.pdf>

[19] ČSN EN 13631 – 3 Zkoušení požární odolnosti

[20] Královopolské tunely. [online]. Dostupné z:  
[http://www.mestsky-okruh-brno.cz/fileadmin/user\\_upload/aktuality/kralovopolsky-tunel.pdf](http://www.mestsky-okruh-brno.cz/fileadmin/user_upload/aktuality/kralovopolsky-tunel.pdf)

[21] Kurc, L., Navrhování sekundárního ostění Královopolských tunelů [online]. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2011\\_03\\_TO/Kurc\\_Rozek-Navrhovani\\_sek\\_osteni\\_Kral\\_tunelu.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2011_03_TO/Kurc_Rozek-Navrhovani_sek_osteni_Kral_tunelu.pdf)

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ

*Obrázek 1: polypropylenová vlákna*

*Obrázek 2: skelná vlákna*

*Obrázek 3: ocelová vlákna*

*Obrázek 5: řez tunelového tubusu královopolských tunelů*

*Obrázek 6: referenční receptura*

*Obrázek 7: receptura P1*

*Obrázek 8: receptura P2*

*Obrázek 9: receptura S*

*Obrázek 10: receptura D*

*Obrázek 11: receptura P1+D*

*Obrázek 12: receptura P1+POP*

*Obrázek 13: receptura REF a S*

*Obrázek 14: receptura P1 + receptura P1+P*

*Obrázek 15: zatížení vzorků přímým plamenem*

## 9. SEZNAM TABULEK

*Tabulka 1: vyvinutá energie při dané délce požáru*

*Tabulka 2: stupeň a doba požární odolnosti*

*Tabulka 3: mezní stavy požární odolnosti*

*Tabulka 4: základní technické parametry*

*Tabulka 5: složky CEM I 42,5 R Mokrý*

*Tabulka 6: objemová a sypná hmotnost kameniv*

*Tabulka 7: síťový rozbor kameniva 0 – 4 mm*

*Tabulka 8: síťový rozbor kameniva 4 – 8 mm*

*Tabulka 9: síťový rozbor kameniva 8 – 16 mm*

*Tabulka 10: složení betonu na m<sup>3</sup>*

*Tabulka 11: zkoušky čerstvého betonu*

*Tabulka 12: zkoušky ztvrdlého betonu*

*Tabulka 13: srovnání pevností v tlaku vzorků zatížených a nezatížených přímým plamenem*

## 10. SEZNAM GRAFŮ

*Graf 1: teplotní křivky*

*Graf 2: křivka zrnitosti kameniva 0 – 4 mm*

*Graf 3: křivka zrnitosti kameniva 4 – 8 mm*

*Graf 4: křivka zrnitosti kameniva 8 – 16 mm*

*Graf 5: objemová hmotnost po 7 a 28 dnech*

*Graf 6: pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech*

*Graf 7: RTG difrakční analýza všech receptur při teplotě 600 °C*

*Graf 8: RTG difrakční analýza všech receptur při teplotě 1000 °C*